

Möglichkeiten und Grenzen der zukünftigen Anwendung von ZfP-Verfahren an Brücken- und Tunnelbauwerken

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 194

bast

Möglichkeiten und Grenzen der zukünftigen Anwendung von ZfP-Verfahren an Brücken- und Tunnelbauwerken

von

Alexander Taffe
Sarah Vonk

Fachgebiet
Baustoffkunde, Bauwerksdiagnose
und Zerstörungsfreie Prüfung
Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 194

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

- A - Allgemeines
- B - Brücken- und Ingenieurbau
- F - Fahrzeugtechnik
- M - Mensch und Sicherheit
- S - Straßenbau
- V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 15.0534
Möglichkeiten und Grenzen der zukünftigen Anwendung von ZfP-Verfahren an Brücken- und Tunnelbauwerken

Fachbetreuung

Martin Friese
Ralph Holst

Referat

Grundsatzfragen der Bauwerkserhaltung

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion

Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48

www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293

ISBN 978-3-95606-746-4

Bergisch Gladbach, Juni 2023

Kurzfassung – Abstract

Möglichkeiten und Grenzen der zukünftigen Anwendung von ZfP-Verfahren an Brücken- und Tunnelbauwerken

Dieses Forschungsvorhaben beschäftigt sich mit der Eignung des Radarverfahrens hinsichtlich der Prüfaufgabe Betondeckungsmessung. Das Radarverfahren wird hierzu mit dem etablierten magnetisch induktiven Verfahren in der Betondeckungsmessung verglichen. Übergeordnete Ziele sind langfristige Untersuchungen mit Radar an jungen Betonkörpern und nach hinreichender Austrocknung sowie Betondeckungsmessungen, die zu schwierig interpretierbaren Ergebnissen führen. Für vergleichende Untersuchungen zur Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Radarverfahrens und dem magnetisch induktiven Verfahren wurden Testkörper hergestellt. Der Einfluss der Betonfeuchte auf die Genauigkeit der Messergebnisse wurde an einem Testkörper über einen Zeitraum von 15 Monaten untersucht. Ein weiterer Testkörper wurde für die Untersuchung der getrennten Erkennbarkeit von benachbarten Stäben und zum Einfluss dichtbewehrter Bereiche über einen Zeitraum von 7,5 Monaten regelmäßig gemessen. Für die Messungen an den hergestellten Testkörpern wurden das Radargerät Hilti PS-1000, für das magnetisch induktive Referenzverfahren das Profoscope und das Profometer der Firma Proceq sowie zur Feuchtemessung die Gann Aktiv Elektrode verwendet. Für die Auswertung und Bewertung der Messergebnisse wurden die Radardaten in die Software ReflexW eingelesen, bearbeitet und die Laufzeiten bestimmt. Im Hinblick auf den Messaufwand und die Messgeschwindigkeit unterscheiden sich das Radarverfahren und das magnetisch induktive Referenzverfahren kaum. In der Auswertung ist das Radarverfahren jedoch zeitintensiver und erfordert mehr Erfahrung, Praxis im Umgang mit der Software und Kalibrierung der Permittivität. Die Ergebnisse zeigen, dass sich das magnetisch induktive Verfahren sich für eine Detektion der Bewehrungsstäbe mit einer Betondeckungsmäßen von 20 - 70 mm bei Einhaltung der im DBV-Merkblatt geforderten Genauigkeit eignet. Die Bewehrungsstäbe bis in 150 mm Tiefe konnten schon drei Tage nach der Betonage mit dem Radargerät detektiert werden. Hier konnten im oberflächennahen Bereich die Bewehrungsstäbe mit Abweichung und im tieferen Bereich ohne nennenswerte Abweichung detektiert werden. Den Abschluss bildet eine Handlungsanweisung, die dem Anwender hilft, die Stärken beider Verfahren unter Berücksichtigung der Randbedingungen nutzen zu können.

Possibilities and limits of the future application of NDT methods on bridge and tunnel structures

This research project deals with the suitability of the gpr (ground penetrating radar) method. The gpr method is being compared with the established magnetic inductive method in concrete cover measurement. The primary targets are the investigations on young concrete bodies and subsequently drying and concrete cover measurements, which lead to difficult interpretable results. To determine the performance of the gpr and the magnetic inductive method in comparative investigations, two specimens were built. The influence of the concrete moisture on the accuracy of the measurement results were been examined over a time period of 15 months on one specimen. Another specimen was measured for the separate detectability of neighboring rebars and the influence of densely reinforced areas over a period of 7.5 months. For the measurements on the specimens the Hilti PS-1000 was used as a gpr device and the Profometer and Profoscope as the magnetic inductive reference devices. For tracking the humidity of the concrete, the Gann Active Electrode was used. For the evaluation and valuation of the measurement results, the gpr data was imported in the reflexW software, where the data was been processed and the transit times determined. In view of the measurement effort and the measuring speed, the gpr and the magnetic inductive method hardly deviate from each other. In the evaluation, the gpr method is more time consuming and requires more experience, handling software and calibration of the permittivity. The results show that the magnetic inductive method is suitable for detecting rebars with a concrete cover of 20 - 70 mm while maintaining the leaflet of the German concrete and construction engineering association (DBV) required accuracy. The rebars up to 150 mm depth could already be detected with gpr three days after concreting. In the near-surface area, the rebars could be detected with a deviation and in the deeper area without appreciable deviation. The research ends with a practical instruction that helps the user to use the strengths of both methods, taking into account the boundary conditions.

Summary

Possibilities and limits of the future application of NDT methods on bridge and tunnel structures

The federal highway network includes a large number of bridges, tunnels and other engineering structures. The perfect condition of these buildings has enormous economic importance. Damage can lead to far-reaching social and economic consequences. The increasing demands of increasing traffic, the aging of structures and problems with the durability of older bridge structures can lead to severe traffic disruptions, which entail economic disadvantages. Non-destructive testing methods are becoming increasingly important in connection with the assessment of the building stock, but also in the course of quality management in new constructions. The concrete cover must be regularly checked on bridge constructions made of steel or prestressed concrete as well as tunnel constructions, since it has an influence on the durability as well as on the bondage between reinforcement and concrete as well as on fire protection. Despite the high importance of concrete cover and the availability of suitable methods, there are no specific rules for concrete cover measurement on the bridge and in the tunnel. The leaflet "Concrete cover and reinforcement: securing the concrete cover in design, production and manufacture of reinforcement and concrete according to eurocode 2" [1] from 2015 of the German concrete and construction engineering association e. V. (DBV) explicitly refers to DIN EN 1992 and thus on building construction. Therefore, this research project deals with the suitability of the gpr (ground penetrating radar) method with regard to the test task: concrete cover measurement - primarily on existing structures, but also in the quality assurance in new construction. The gpr method, which has already established itself as a fast method for detections of tendons, is being compared with the magnetic inductive method established in concrete cover measurement. The primary targets are long-term investigations with gpr on young concrete bodies and after sufficient dehydration as well as concrete cover measurements, which lead to difficult interpretable results.

The literature search in AP1 showed that there is a mention of gpr for concrete cover measurement only in special cases. This is the case when the boundary conditions do not allow the use of magnetic inductive due to excessive concrete coverages. For example, concrete cover measurements on bored piles with concrete covers of up to 20 cm have been reported in [2]. From this, it can be concluded that depths of more than 7 cm make a use of gpr appear useful because the detection depth of magnetic inductive methods is exceeded.

Test specimen were designed and manufactured for the comparative investigations on the performance of the gpr method for the magnetic inductive methods in AP2. For the long-term studies on the influence of concrete moisture over a period of 15 months, the HTW-TK1 test specimen was built in the summer of

2017 (Figure 1a). The main focus was on the precise installation of reinforcing bars to achieve its very definable, actual concrete cover. In order to obtain concrete coverings of 20...90 mm, the arrangement of eight reinforcing bars with a diameter of 12 mm was stepped in 10 mm increments with an axis distance of 15 cm. In April 2018, another HTW TK4 test specimen was built for the study of the separate resolution of adjacent rods and the influence of densely reinforced areas over a period of 7.5 months (Figure 1b). For this purpose, five rebars of the same depth were installed in concrete covers of 50, 100, 150, 200, 250 and 300 mm. The first three reinforcing rebars each formed two rebar spacing distances of 5 cm, while the third to fifth reinforcing rebar each formed two rebar axis distances of 10 cm (Figure 2). Of interest was in each case the reference rebar in the middle, which each has rebars to the left and right with the same rebar axis distance. In addition, the HTW-TK4 specimen received an area without near-surface reinforcement (bottom) and with near-surface reinforcement (top) to test the influence of densely reinforced areas.

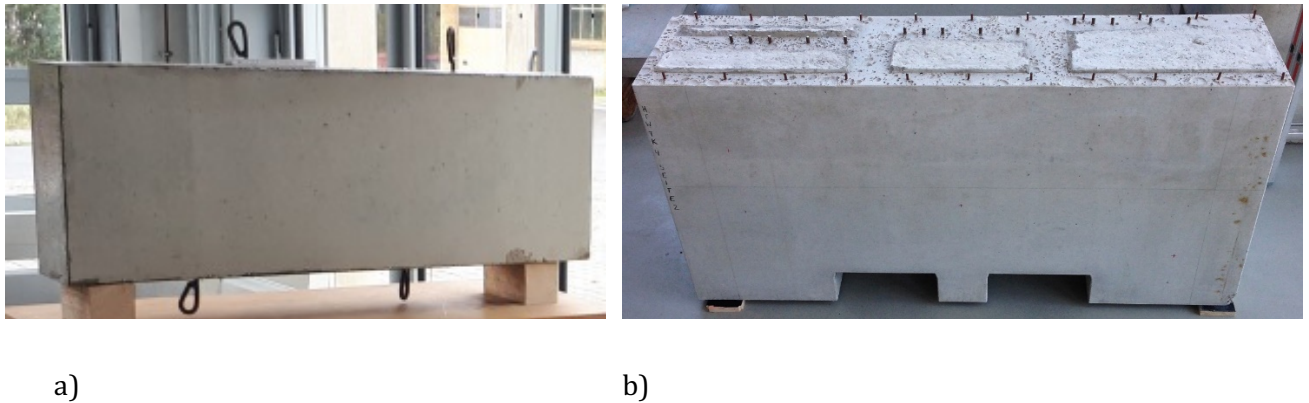


Figure 1: a) specimen HTW-TK1 b) specimen HTW-TK4

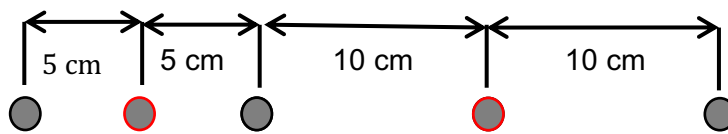


Figure 2: systematics of the arrangement of the rebars in the specimen HTW-TK4.

The following devices were used to carry out the measurements on the prepared test specimen (AP2b):

- gpr method: Hilti PS 1000 X-Scan System
- magnetic inductive methods: Profometer PM-630 and Profoscope
- humidity measuring device: GANN active electrode B50 in connection with the hydromette M4050

For the monitoring of moisture development, each specimen was measured at the front and back at three measuring points, as a total of six measuring points. Initially, the moisture measurements were at shorter

intervals (three days, weekly) and with increasing hydration of the concrete body the measurement intervals were extended (three weeks, four weeks). The largest change in concrete moisture/permittivity was observed in the first 45-50 days after concreting of the specimens (Figure 3). This relates to the rate of hydration of the concrete, since there is a lot of free water within the first time after concreting, which is bound by the hydration.

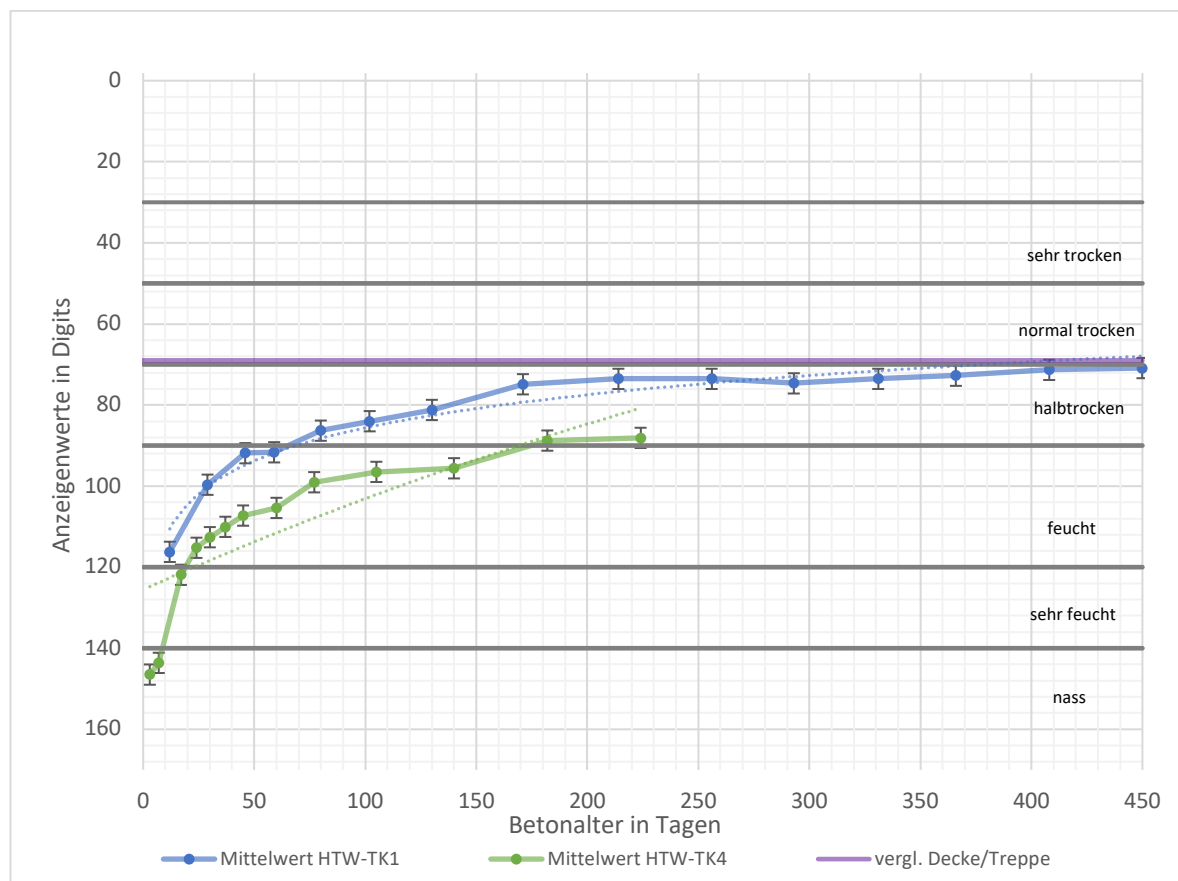


Figure 3: Development of the humidity of the specimen HTW-TK1 and HTW-TK4 after measurement of the concrete moisture with the GANN Hydromette in digits.

Since the magnetic inductive measurements for concrete coverings between 30 and 60 mm led to impermissible deviations according to DBV leaflet [1] with the Profometer, the concrete covers were as well measured with another magnetic inductive device, the Profoscope. With the Profoscope, the deviations amount to + 1 mm for concrete covers up to 70 mm - according to the permissible deviations according to the DBV leaflet [1]. Thus, the Profoscope is a more suitable device for the reference method and was used for further comparison with the gpr results on the HTW-TK1.

For the evaluation and evaluation of the measurement results (AP2c), the gpr data were read into the manufacturer-neutral software ReflexW, processed according to a fixed sequence of work steps and the running times/concrete covers determined. For an objective evaluation of the measurement data, the indication of measurement result and measurement uncertainty is required. To this end, the systematic

and random deviations were determined and a measurement uncertainty analysis was carried out. The largest parts of the measurement uncertainty have the deviation of the lead time, the uncertainty of the reading of the term and the diffusion of the permittivity.

Findings of comparative assessment gpr vs. magnetic inductive method and application notes (AP3 + AP4)

With regard to the measurement effort and the measuring speed, the gpr method and the magnetic inductive reference method do not differ significantly. In the evaluation, however, the gpr method is more time-consuming and requires experience, practice in dealing with the software for processing the data and calibration of the zero point and the permittivity.

The magnetic inductive methods are suitable for detecting the reinforcing bars with a concrete cover of 20 - 70 mm while maintaining the accuracy required in the DBV leaflet [1]. It is also possible to detect the reinforcing bars at 80 and 90 mm depth, but with an accuracy of 3 mm (no longer in accordance with the DBV accuracy requirements). In the near-surface area (40...90 mm), the rebars can be detected with a deviation of + 5 mm with the gpr device. This is in line with research results [3] in which the deviations in the near-surface range at a confidence level of 95% are absolutely ± 5 mm for concrete coverages of approx. 5 cm. Therefore, gpr is an alternative to magnetic inductive methods if the rebar diameter is not known in existing structures and deviations of up to ± 8 mm can occur if the reinforcement is detected without knowledge of the diameter. In addition, gpr is suitable for densely reinforced, double-layered areas and for the separate detection of closely adjacent bars, both of which are not possible with the magnetic inductive method. In the densely adjacent bars ($a = 5$ cm), detection is possible down to a depth of 150 mm and in the second reinforcing position to a depth of 100 mm.

Literature

- [1] *DBV-Merkblatt: Betondeckung und Bewehrung: Sicherung der Betondeckung beim Entwerfen, Herstellen und Einbauen der Bewehrung sowie des Betons nach Eurocode 2.* Berlin: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (DBV), 2015.
- [2] *DBV-Merkblatt: Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen.* Berlin: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (DBV), 2014.
- [3] D. Streicher, C. Boller und A. Taffe, „Quantitative Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Radar an Stahl- und Spannbetonbauteilen“. Vortrag Mo.3.B.1. Erfurt: DGZfP, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V, Mai. 10 2010.

Inhalt

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Struktur und Durchführung des Forschungsvorhabens | 10 |
| 2 | Literaturrecherche zum Stand der Wissenschaft und Technik (AP1) | 12 |
| 2.1 | Radaranwendungen zur Lageermittlung von Spanngliedern und anderen Prüfaufgaben..... | 12 |
| 2.2 | Anwendungsgrenze von Radar | 15 |
| 2.3 | Abgrenzung von Radar zu Ultraschall | 17 |
| 2.4 | Grundsätzliche Eignung von Radar zur Betondeckungsmessung..... | 18 |
| 2.5 | Klassische Verfahren zur Betondeckungsmessung | 20 |
| 2.6 | Recherche geeigneter Testkörper..... | 22 |
| 3 | Ergebnisse der vergleichenden Untersuchungen (AP2) | 25 |
| 3.1 | Konzeption und Herstellung von Testkörpern (AP2a)..... | 25 |
| 3.2 | Durchführung der Messungen an den hergestellten Testkörpern (AP2b)..... | 34 |
| 3.2.1 | Messgeräte..... | 34 |
| 3.2.2 | Messstrategie..... | 41 |
| 3.3 | Auswertung und Bewertung der Messergebnisse (AP2c) | 44 |
| 3.3.1 | Entwicklung der Permittivität/Betonfeuchte..... | 45 |
| 3.3.2 | Magnetisch induktives Referenzverfahren..... | 50 |
| 3.3.3 | Auswertung der Radarergebnisse..... | 54 |
| 3.3.4 | Messunsicherheit..... | 66 |
| 4 | Vergleichende Beurteilung Radar vs. magnetisch induktive Verfahren (AP3) | 70 |
| 5 | Anwendungshinweise (AP4) | 74 |
| 6 | Literaturverzeichnis..... | 78 |
| 7 | Tabellenverzeichnis | 81 |
| 8 | Abbildungsverzeichnis..... | 82 |
| 9 | Anhang..... | 85 |

1 Struktur und Durchführung des Forschungsvorhabens

Das Forschungsvorhaben mit dem Titel „Möglichkeiten und Grenzen der zukünftigen Anwendung von ZfP-Verfahren an Brücken- und Tunnelbauwerken“ (Kurzform: *Radar_praxisnah*) wurde seitens der BAST in dem Leistungsverzeichnis FE 15.0534/2011/GRB beschrieben. Darin ist die Aufteilung in folgende Arbeitspakete vorgegeben:

- AP1: Literaturrecherche, Erhebung und Darstellung des Sachstands
- AP2: Vergleichende Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit des Radarverfahrens und der klassischen magnetisch induktiven Verfahren
Darin sollten folgende Unterpunkte berücksichtigt werden:
 - a) Konzeption und Herstellung von Testkörpern
 - b) Messungen an den Testkörpern am jungen Beton und nach hinreichender „Austrocknung“
 - c) Auswertung und Bewertung der Messergebnisse
- AP3: Beurteilung des Radarverfahrens im Vergleich zu dem Referenzverfahren [hier: magnetisch induktive Verfahren] hinsichtlich
 - Aufwand (Messung, Auswertung)
 - Messgeschwindigkeit
 - Fehleranfälligkeit/Genauigkeit
 - Messgenauigkeit
- AP4: Formulieren von Anwendungshinweisen.

Mit dem Angebot der HTW vom Mai 2017 wurde gemäß Anhang I das Gesamtziel dahingehend beschrieben, die Eignung des Radarverfahrens hinsichtlich der Prüfaufgabe Betondeckungsmessung quantitativ nachzuweisen und Anwendungshinweise zu geben, die zu richtigen Ergebnissen und zuverlässigen Prüfaussagen unter Berücksichtigung von Kundenanforderungen führen. Im Einzelnen sollen Erkenntnisse zu folgenden Punkten ermittelt werden:

1. Zeitliche Entwicklung der erzielbaren Detektionstiefe
2. Erzielbare Genauigkeit von Radar im Vergleich zu magnetisch induktiven Verfahren
3. Hinweise zur Durchführung richtiger Messungen
4. Angaben zu Fehleranfälligkeit im Spannungsfeld Messzeit/Wirtschaftlichkeit

Im Angebot der HTW vom Mai 2017 wurden die Vorgaben der BAST in den nachfolgend kurz beschriebenen Arbeitspaketen umgesetzt, die im Wesentlichen den Vorgaben gemäß

Leistungsverzeichnis der BAST entsprechen. Dieser Bericht greift die Bezeichnung der Arbeitspakete als Kapitelüberschrift auf, so dass die Inhalte der Hauptkapitel identisch mit den Arbeitspaketen sind.

Der vorgesehene Zeitplan in Abbildung 1 gibt die Struktur des Vorhabens an. Der **Beginn des Vorhabens** wurde seitens der BAST mit dem **15.09.2017** festgelegt. Der Zeitplan wurde eingehalten. Es hat in regelmäßigen Abständen Treffen und Rücksprachen mit dem forschungsbegleitenden Ausschuss gegeben. Im Vorfeld wurden seitens der HTW bereits einige Voruntersuchungen durchgeführt, die in den weiteren Verlauf des Vorhabens eingeflossen sind.

| | Monate | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|--------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Arbeitspaket (AP) | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| AP1: Literaturrecherche | ■ | ■ | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2: Vergl. Unters. | | | ← | | | | | | | | | | | | | | | → |
| AP2a: Testkörper | | | ■ | ■ | | | | | | | | | | | | | | |
| AP2b: Radar langfristig | | | | | ■ | ■ | ■ | | ■ | | ■ | | | ■ | | | ■ | |
| AP2c: Vergleichsmess. | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| AP3: Vergl. Beurteilung | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |
| AP4: Anwendungshinweise | | | | | | | | | | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ | ■ |

Abbildung 1: Vorgesehener Zeitplan zur Darstellung der Methodik des Vorgehens durch Aufgliederung in einzelne Arbeitspakete (Beginn: 15.09.2017)

Das Vorhaben begann mit einer **Literaturrecherche (AP1)**.

Der Hauptpunkt des Vorhabens **Vergleichende Untersuchungen (AP2)** wurde mit der Konzeption und dem Bau von Testkörpern (AP2a) begonnen. Erste Untersuchungen wurden daran im Zuge der langfristigen Untersuchungen (AP2b) durchgeführt.

Im Anschluss folgte das **AP3 (vergleichende Beurteilung)** und **AP4 (Anwendungshinweise)**, welche auf der Grundlage der Auswertungen von **AP2** basieren.

Übergeordnete Ziele sind:

- Langfristige Untersuchungen mit Radar
- Betondeckungsmessungen, die zu schwierig interpretierbaren Ergebnissen führen

2 Literaturrecherche zum Stand der Wissenschaft und Technik (AP1)

Die **Literaturrecherche (AP1)**, wurde hinsichtlich folgender Punkte zusammengetragen:

- Möglichkeiten und Grenzen von derzeitigen Radaranwendungen zur Lageermittlung von Spanngliedern und anderen Prüfaufgaben
- Möglichkeiten und Grenzen von magnetisch induktiven Verfahren zur Betondeckungsmessung
- Abgrenzung beider Verfahren und Zielermittlung zum Einsatz von Radar zur Betondeckungsmessung
- Recherche geeigneter Testkörper zur vergleichenden Messung in AP2b

2.1 Radaranwendungen zur Lageermittlung von Spanngliedern und anderen Prüfaufgaben

Zerstörungsfreie Prüfverfahren haben in den letzten knapp 20 Jahren sehr an Bedeutung gewonnen. Deren Anwendung wurde insbesondere von der BAST in mehreren Forschungsvorhaben erprobt und dokumentiert ([1–4]). Dabei wurde Radar primär zur Ortung von Spanngliedern eingesetzt. Der Einsatz erfolgte für Kleinflächen automatisiert [3] und für große Brückenflächen von mehreren Hundert Quadratmetern von Hand [4].

Der Stand von Forschung und Technik zu Radaruntersuchungen an Betonbauwerken ist in einem *Merkblatt der Deutschen Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP)* seit 2008 dokumentiert [5]. Darin werden folgende Prüfaufgaben für Beton genannt:

- *„Ortung der Bewehrung und der Spannglieder*
- *Ortung und Lagebestimmung von Dübeln und Ankern in Betonfahrbahnen (Qualitätssicherung)*
- *Dickenmessung von einseitig zugänglichen Bauteilen (Qualitätssicherung)*
- *Ortung von strukturellen Anomalien wie z.B. Hohlräumen oder Fehlstellen*
- *Detektion und Unterscheidung von Schichtgrenzen wie z. B. Estrich-Beton*
- *qualitative Bestimmung der Feuchteverteilung“*

Die Grundlagen und Praxisanwendungen wurden bereits 2004 umfassend im *Bauphysik-Kalender* [6] beschrieben. Konkret wurde dort das Anwendungsbeispiel Spannglied- und Bewehrungsortung beschrieben. Der Einsatzbereich wird für Eindringtiefen oberhalb der magnetisch induktiven Verfahren angegeben. Für eine Fahrbahnplatte von 24 cm Dicke werden Spannglieder in einer Tiefe bis 15 cm

geortet. Es wird auf **mögliche Detektionstiefen von 30 bis 40 cm unter einer zweilagigen „schlaffen“ Bewehrung mit Stababständen größer 7 cm hingewiesen** (ohne Literaturverweis).

Basierend auf den verfahrensorientierten Merkblättern und Veröffentlichungen hat der DBV (Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein) im Jahr 2014 das *Merkblatt „Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen“* herausgegeben [7]. Dieses Merkblatt ist prüfaufgabenorientiert. Dort werden für Radar folgende Prüfaufgaben angegeben:

- **Dickenmessung** mit Radar
Bodenplatte von 20 cm Dicke mit 1,5-GHz-Antenne; Hinweis auf Detektionstiefe in Bezug auf Betonfeuchte (Verweis auf [8] und Abbildung 4)
- **Bewehrungsart** mit Radar
Bügelbewehrung mit 10 bis 20 cm Tiefe; verschobener Bewehrungskorb in einem Tunnel am First bis 60 cm Tiefe
- **Betondeckung** mit Radar
Betondeckung an einer überschnittenen Bohrpfahlwand mit Wendelbewehrung und einer **Betondeckung bis 20 cm; zweilagige Bewehrung bis 10 cm** (siehe unten, Abbildung 2, [7, S. 49])
- **Bewehrungsart** mit Radar
Leistungsfähigkeit und Grenzen von magnetisch induktiven Verfahren und Radar werden am Beispiel aus [9] eines **mehrlagigen Übergreifungsstoßes von Matten- und Stabstahlbewehrung (20 bis 80 mm Tiefe)** dargestellt (Abbildung 3). Während mit dem magn. ind. Verfahren die Tiefenlage recht genau bestimmt werden kann, gelingt mit Radar eine bessere Trennung der einzelnen Stäbe voneinander [7, S. 51].
- **Ortung von Hüllrohren** mit Radar
Ortung von Hüllrohren an Bestandsbauwerken **bis 30 cm Tiefe** (Regelanwendung vor Ausführung von Bohrungen insbesondere an Fahrbahnplatten mit Querbewehrung); laterale Lage im Vordergrund; Tiefenlage untergeordnet [7, S. 49]
- **Lagebestimmung von Dübeln** (Regelung in FGSV-Arbeitspapier [10])
Standardmäßig mit Wirbelstrom („Pulsinduktion“) bis 20 bis 30 cm; Radar wird genannt ohne Tiefenangabe. Es werden *Lageabweichungen* detektiert; die absolute Tiefenlage ist von untergeordneter Bedeutung.

Die weiteren in [7] beschriebenen Anwendungen von Radar (Dicke von Fahrbahndecken, Schichtaufbau, Elementwände und Deckenaufbauten) liefern im Sinne der hier zu behandelnden Prüfaufgaben keinen weiteren Aufschluss.

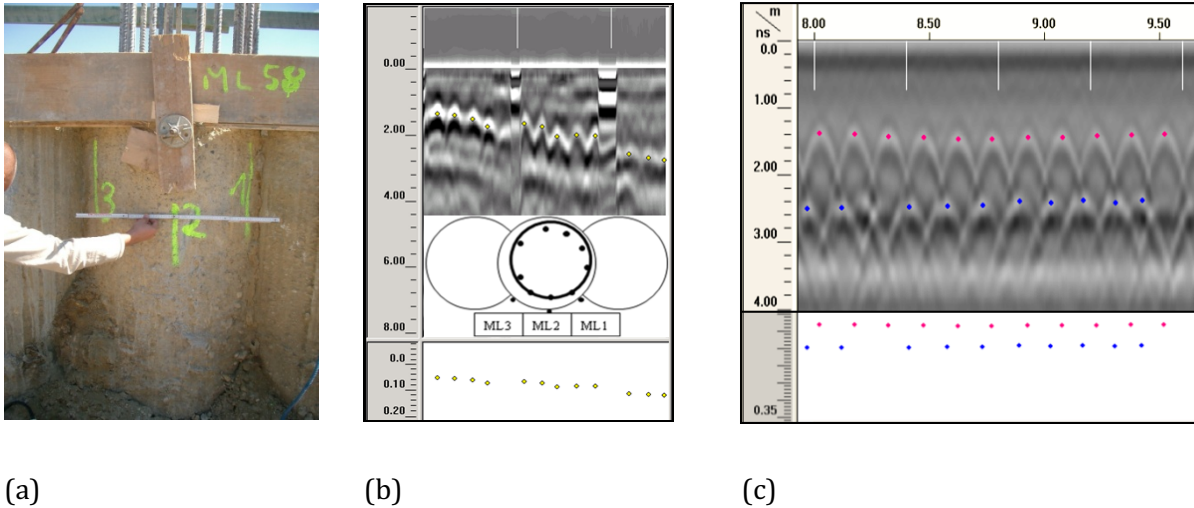


Abbildung 2: (a) überschnittene Bohrpfehlwand mit Lage der Messlinien; (b) Radargramm mit Lage der ausgewerteten Bewehrungsstäbe und Anordnung von Pfählen und des Bewehrungskorbs; (c) Radargramm mit Lage der ausgewerteten Bewehrungsstäbe bei zweilagiger Bewehrung (1. Lage Brandschutz, 2. Lage Tragbewehrung)[7].

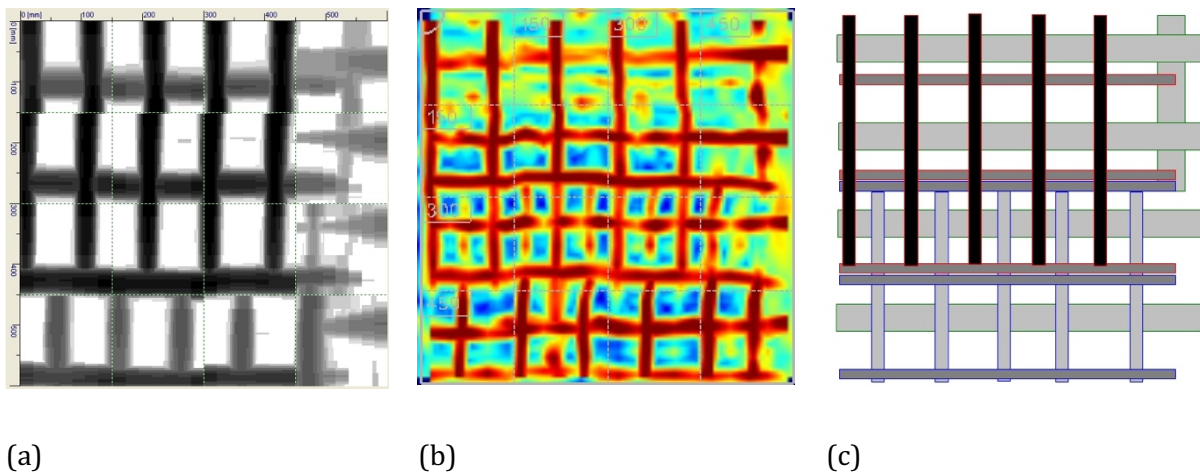


Abbildung 3: Messergebnisse über einen Tiefenbereich von 20 bis 80 mm mit (a) magnetischem Wechselfeld und (b) Radar; (c) Darstellung der ermittelten Lagen der verlegten Bewehrung [7].

Eine konkrete Erwähnung von Radar zur Betondeckungsmessung findet sich in der Baupraxis nur in Sonderfällen. Dies ist der Fall, wenn die Randbedingungen einen Einsatz von magnetisch induktiven aufgrund zu großer Betondeckungen nicht erlauben. So werden u.a. in [7] Betondeckungsmessungen an

Bohrpfählen mit Betondeckungen von bis zu 20 cm berichtet wie in Abbildung 2 dargestellt. **Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass Tiefenlagen von mehr als 7 cm einen Einsatz von Radar sinnvoll erscheinen lassen, weil die Detektionstiefe von magnetisch induktiven überschritten ist** (siehe Kapitel 2.5).

In der Ausgabe des *Bauphysik-Kalenders* aus dem Jahr 2012 findet sich eine umfangreiche Abhandlung über Radar. Dort wird aber das Hauptaugenmerk auf Strukturaufklärung in Mauerwerk gelegt [11]. Die übrigen Artikel dort [Walther, Hasenstab] und [Hillemeier, Taffe] sind eher von verfahrenserklärender Natur bzw. bilden die Regelwerke ab.

Zusammenfassend lässt sich aus diesen Veröffentlichungen festhalten, dass im deutschsprachigen Raum Radar primär zur Strukturaufklärung verwendet wird. Das Hauptaugenmerk gilt dabei der lateralen Lage von Bewehrung und Spanngliedern. Der Tiefenlage wird aufgrund der Abhängigkeit von der Betonfeuchte kaum Aufmerksamkeit geschenkt. Hinweise auf Betondeckungsmessungen finden sich nur im Einzelfall, wenn die Anwendungsgrenze der magnetisch induktiven Verfahren überschritten ist.

2.2 Anwendungsgrenze von Radar

Der Einsatz von Radar wird durch die Betonfeuchte – insbesondere bei jungem Beton – erheblich eingeschränkt, so dass größere Detektionstiefen mit Radar vorzugsweise an älterem und (nahezu) vollständig hydratisiertem Beton erreicht werden können. Erkenntnisse zu möglichen Detektionstiefen in Abhängigkeit von Betonalter und Antennenfrequenz des Radargeräts sind in [8] veröffentlicht. Diese bislang einzig im deutschsprachigen Raum veröffentlichten praxisrelevanten Ergebnisse haben auch Eingang in das Handbuch Bauwerksprüfung gefunden [12].

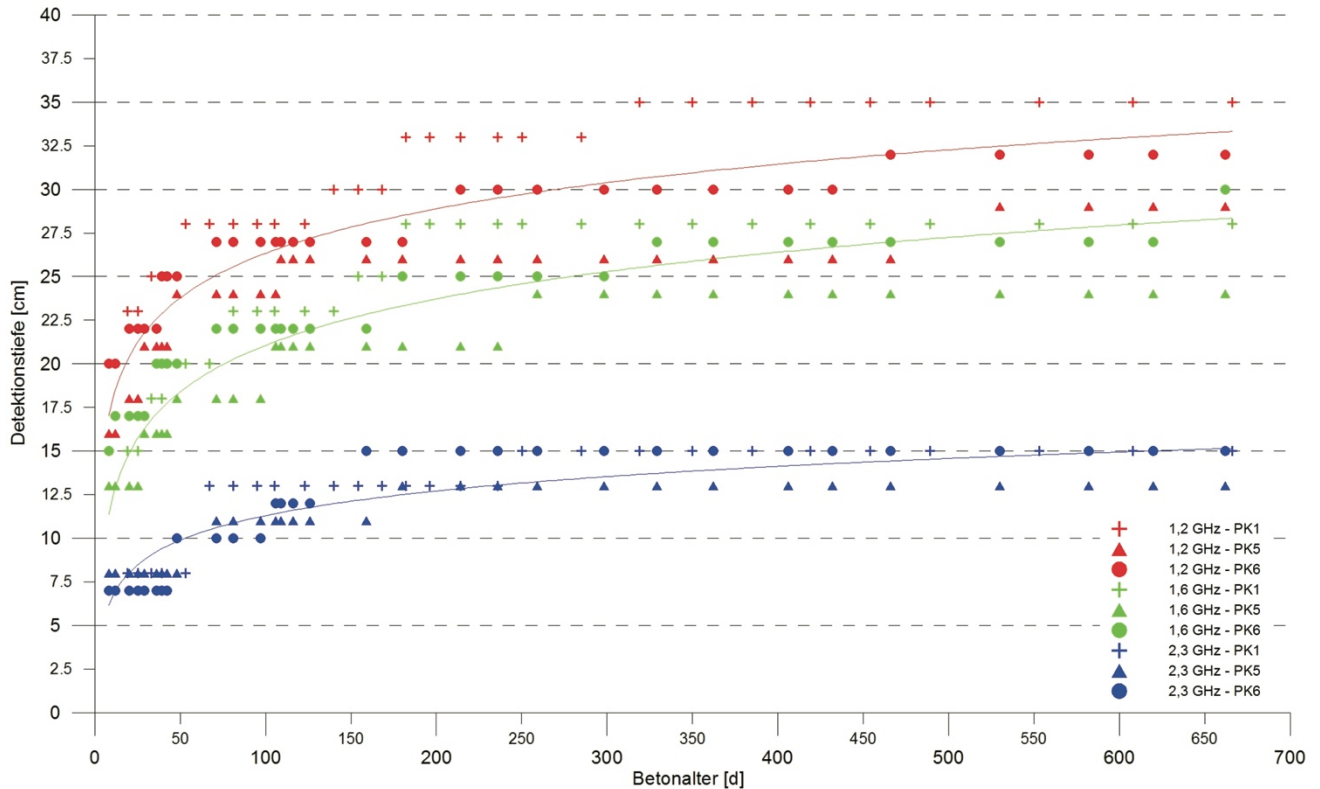


Abbildung 4: Mit Radar an Stahlbetonbauteilen erzielbare Detektionstiefen von Bewehrungsstäben (Durchmesser 8 bis 28 mm) in Abhängigkeit von der Antennenmittenfrequenz des verwendeten Radargeräts, der Zementart (PK1: CEM-II; PK5: CEM-I; PK6: CEM-III) und dem Betonalter in Tagen [8]; entnommen aus [12].

Abbildung 4 aus [8] zeigt die **Leistungsfähigkeit von Radar je nach Betonalter und Antennenfrequenz Detektionstiefen von Bewehrung zwischen 15 und 35 cm zu erreichen**. Inwieweit solche Detektionstiefen auch an anderen Betonen erzielt werden können und ob dies auch bei praxisüblichen Bewehrungsabständen möglich ist, ist noch nicht zufriedenstellend erforscht und zeigt den möglichen Bereich der in diesem Vorhaben vorgesehenen Untersuchungen auf.

Weitere Erkenntnisse zu Detektionstiefen mit Radar gibt [13]. Hier wurden die Detektionstiefen sehr fundamental mit Hilfe der POD (Probability of Detection) ermittelt. Konkret wurden folgende Ergebnisse mit verschiedenen Geräten und Antennen für ein **Betalter von 203 Tagen** erzielt:

- Erzielbare **Detektionstiefen** liegen bei Antennenfrequenzen um **1 GHz** zwischen rd. **23 und 35 cm** (ohne oberflächennahe Bewehrung, Größtkorn 16 mm)
- mit Größtkorn 32 mm zwischen 25 und 36 cm und damit geringfügig höher
- Erzielbare **Detektionstiefen** liegen bei Antennenfrequenzen um **2 GHz** zwischen rd. **12 und 21 cm** (ohne oberflächennahe Bewehrung, Größtkorn 16 mm)
- mit Größtkorn 32 mm zwischen 11 und 24 cm und damit geringfügig höher

- Für Bewehrungsstäbe vom Durchmesser 12 mm werden gegenüber Durchmesser 28 mm zwischen 1 bis 5 mm größere Detektionstiefen erzielt
- Die Anordnung **oberflächennaher Bewehrung** (Stababstand 15 cm) in Form einer Bewehrungsmatte vom Typ Q188A führte zu einer **Abnahme der Detektionstiefe zwischen 3 und 27%**
- **Die Anwendungsgrenze von Radar wird als Erfahrungswert mit einem Stababstand von 8 cm angegeben**

Die mittels POD ermittelten Detektionstiefen ($a_{90/95}$) stimmen mit den subjektiv ermittelten Detektionsgrenzen gemäß Abbildung 4 recht gut überein.

2.3 Abgrenzung von Radar zu Ultraschall

Auch die Beiträge [14] und [15] der BAM berichten über Radar als Standardverfahren zur Ermittlung der inneren Konstruktion von Spannbetonbauteilen. Dabei werden die Ergebnisse häufig zur späteren schadefreien Kernbohrung an Brückenträgern verwendet. In beiden Beiträgen wird die **Anwendungsgrenze von Radar bezüglich der Detektionstiefe und dem Bewehrungsgrad** deutlich.

In [14] werden metallische Schubnadeln (Durchmesser unbekannt) bis in eine Tiefe von 28 cm detektiert. Die Aufzeichnung der Messergebnisse bis in eine Tiefe von 45 cm und die Tatsache, dass von der gegenüberliegenden Seite gemessen werden musste um die 2. Lage der Schubnadeln zu detektieren, belegt, dass die Anwendungsgrenze in diesem Fall knapp unter 30 cm liegt.

In [15] werden zunächst Radarmessungen von Unterseite und Steg eines Plattenbalkens ausgeführt, um Spannglieder der 2. und 3. Lage zu orten. Dies gelang für Spannglieder mit einer Betondeckung zwischen 16,5 und 23,5 cm. Für die 3. Lage mit einer Tiefe von rd. 30 cm gelang die Ortung in diesem Fall nicht. Die Abstände der Bügelbewehrung liegen gemäß den veröffentlichten Bildern zwischen 10 und 15 cm. Mit den anschließend durchgeführten Ultraschallechountersuchungen (Punkt-Kontakt-Prüfköpfe mit Transversalwellen, Messraster 2 cm, SAFT-Rekonstruktion) konnte die 3. Lage in einer Tiefe von rd. 30 cm detektiert werden. Die Angabe, dass die Abweichung der gemessenen Tiefe (Betondeckung) im Vergleich zu den Bestandsunterlagen kleiner als 2 cm war, zeigt, dass die Genauigkeit der Betondeckungsmessung durch aus im Bereich von 5 %, hier bei rd. 1,5 cm, liegen kann.

Fazit: Auch wenn hinsichtlich der Leistungsfähigkeit von Radar, z. B. gemäß Abbildung 4, Betondeckungen von über 30 cm möglich sind, liegt die Detektionsgrenze bei Brückenbauwerken noch ohne Mindestbewehrung bzw. rissbreitenbeschränkender Bewehrung zwischen 20 und 30 cm. Wenn eine Detektion mit Radar aufgrund zu dicht verlegter Bewehrung misslingt, ist eine Detektion mit Ultraschallecho (Messraster 2 cm und SAFT-Rekonstruktion) möglich.

Abweichungen von rd. 5 % für Betondeckungen bei rd. 30 cm scheinen anhand von Praxisergebnissen plausibel.

Die Anwendung von Ultraschall an Beton ist ebenfalls in einem Merkblatt der DGZfP geregelt und wird für 2018 überarbeitet zur Verfügung stehen [16].

2.4 Grundsätzliche Eignung von Radar zur Betondeckungsmessung

In [17] wurde der Frage nachgegangen, wie sich die Anwendung von Radar durch den Abstand von Sender und Empfänger auf die **Genauigkeit der Messergebnisse bei der Dickenmessung** und folgerichtig natürlich auf die Betondeckungsmessung auswirkt. In Abbildung 5 wird deutlich, dass bei einer Nichtberücksichtigung des Abstands von Sender (S) und Empfänger (E) gerade bei geringen Betondeckungen von den Signalen erheblich längere Laufwege zurückzulegen sind, die das Messergebnis erheblich beeinflussen würden.

Gleichzeitig wird in dem Beitrag gemäß Abbildung 6 gezeigt, dass bei einer Berücksichtigung der Laufwegverlängerung selbst bei einem Luftspalt zwischen Antenne und Betonoberfläche, dessen Breite mit einer Streuung von 0 bis 20 mm angenommen wurde, bei einer Betondeckung von 50 mm Standardabweichungen von rd. 2,5 mm erzielbar sind. **Das bedeutet, dass mit Radar bei der Korrektur der Laufzeit im oberflächennahen Bereich von 5 cm Messunsicherheiten von rd. ± 5 mm (erweiterte Standardabweichungen auf einem Vertrauensniveau von 95 %) erzielt werden können.** Einschränkend muss gesagt werden, dass dies oberhalb der Genauigkeitsanforderung für Betondeckungsmessgeräte gemäß DBV-Merkblatt „Betondeckung und Bewehrung“ [18] von ± 1 mm für Betondeckungen bis 4 cm und ± 2 mm für Betondeckungen bis 6 cm liegt. Allerdings macht Abbildung 5 auch deutlich, dass die Abweichungen für größere Betondeckungen zwischen 10 und 20 cm vernachlässigbar klein werden.

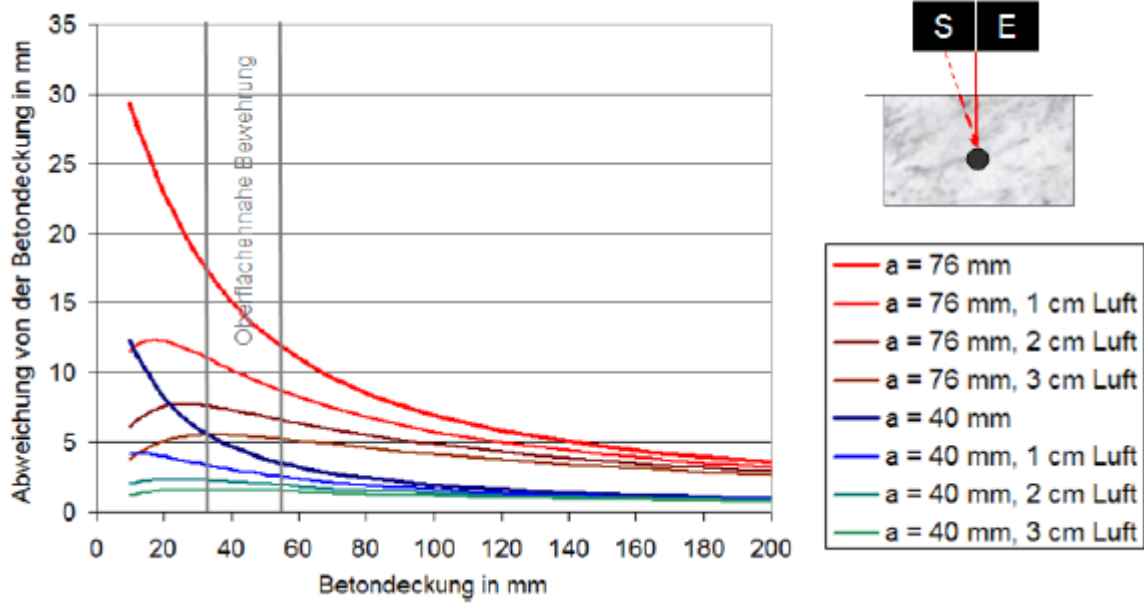
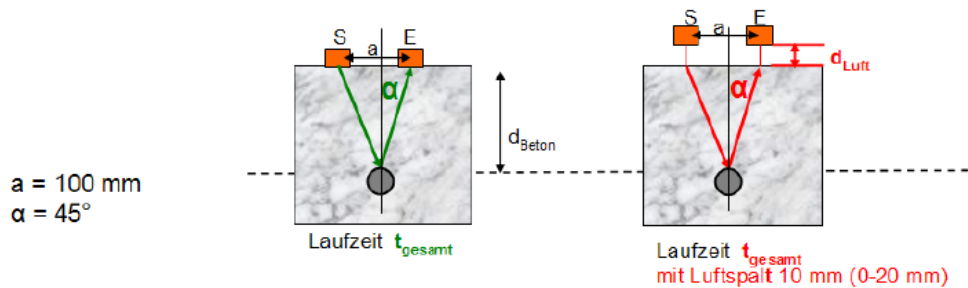


Abbildung 5: Abweichung des angenommenen Laufweges im Beton von der tatsächlichen Betondeckung bei zwei verschiedenen Sender-Empfänger-Abständen a und verschiedenen Abständen der Radarantenne zum Messobjekt [17].

Modellgleichung Laufzeit $t_i = t_{\text{gesamt}} \cos \alpha$ mit $\alpha = f(\epsilon_R, a, t_{\text{Mess}}, \Delta t_V)$



$a = 100 \text{ mm}$
 $\alpha = 45^\circ$

Betondeckung: 50 +/- 2,2 mm

50 +/- 2,6 mm

Budget



Abbildung 6: Modellgleichung, Messergebnis und Unsicherheits-Budget für die Modellbeispiele: Sende-Empfänger-Abstand 100 mm, Winkelabweichung 45°, Betondeckung 50 mm, Abstand der Antenne von der Betonoberfläche 0 bzw. 10 mm [17].

Die dargelegten Ergebnisse zeigen, dass bei Anwendung von Radar zur Betondeckungsmessung im anvisierten Bereich bis zu 20 cm zu Abweichungen kleiner 5 % realistisch sind. Selbst im oberflächennahen Bereich ist eine (erweiterte) Messunsicherheit auf einem Vertrauensniveau von 95 % mit absolut ± 5 mm und relativ von ± 10 % bei Betondeckungen von rd. 5 cm erzielbar.

Dadurch wird belegt, dass Radar von seiner Leistungsfähigkeit geeignet ist, jenseits der Anwendungsgrenze von magnetisch induktiven Verfahren, die mit 60 bis 80 mm anzunehmen ist, akzeptable Abweichungen von ± 5 mm absolut und kleiner ± 10 % auf Betondeckungen größer 5 cm realistisch erscheinen.

2.5 Klassische Verfahren zur Betondeckungsmessung

Die Anwendung von ZfPBau-Verfahren zur Betondeckungsmessung wird im Merkblatt des Deutschen Beton- und Bautechnik-Vereins „Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen“ [7] beschrieben. Darin wird konkret das **magnetische Wechselfeldverfahren** (im Bericht als magnetisch induktiv bezeichnet) genannt mit den beiden Varianten einer **niederfrequenten Anregung** (ferromagnetischer Effekt, z. B. Hilti FerroScan) und einer **hochfrequenten Anregung** (Wirbelstrom, die meisten am Markt befindlichen Geräte wie z. B. Profoscope, Profometer, Hilti PS35). Die **erzielbare Messtiefe** wird mit **10 cm** angegeben, was nach Erfahrung der Verfasser lediglich auf einzeln verlegte Bewehrungsstäbe zutrifft.

Die Verfahren zum Bewehrungsnachweis (Bewehrungsortung und Betondeckung) sind im **DGZfP-Merkblatt zur zerstörungsfreien Betondeckungsmessung und Bewehrungsortung an Stahl- und Spannbetonbauteilen** beschrieben. Neben den magnetisch induktiven Verfahren werden auch Radarverfahren und sog. „Multidetektoren“ beschrieben, deren Betondeckungsmessung auf Laufzeitmessung mittels Radar basiert. Einschränkend heißt es zu den Multidetektoren in [7] :

„Beim Radarverfahren ist zu berücksichtigen, dass insbesondere die Dichte und der Feuchtegehalt des Betons das Messergebnis beeinflussen und deshalb eine Messung ohne vorherige Kalibrierung kein ausreichend genaues Ergebnis erwarten lässt. Die Auswahl der Kalibrierstelle(n) muss repräsentativ für die gesamte Prüffläche erfolgen. Nach einer Kalibrierung kann die Betondeckung mit Radar mit einer Genauigkeit von ca. ± 5 % der Tiefenlage gemessen werden. Die Messgenauigkeit ist somit - insbesondere bei großen Tiefenlagen - geringer als die in [18] genannten Anforderungen. Die mögliche Messtiefe ist stark abhängig von der Bauteilfeuchte und dem Bewehrungsgrad, so dass bei jungem Beton die Eindringtiefe wesentlich reduziert ist.“

Da die am Markt befindlichen Multidetektoren keine Kalibrierung der Radarwellengeschwindigkeit erlauben, sind sie zu einem **Nachweis der Mindestbetondeckung** nach DIN EN 206-1, die für jede Expositionsklasse einzuhalten ist, nicht geeignet. Der Nachweis der Mindestbetondeckung kann qualitativ

(mit zulässiger Unterschreitungszahl) oder quantitativ gemäß **DBV-Merkblatt „Betondeckung und Bewehrung“** erfolgen [18]. Der Nachweis setzt *richtige* Messergebnisse voraus, was die genaue Kenntnis des Durchmessers der Bewehrung und die Berücksichtigung von Nachbarstäben, Kreuzungspunkten u. ä. beinhaltet.

Fazit: Wegen der deutlichen Überschreitung der im DBV-Merkblatt [18] geforderten Genauigkeit von ± 1 bzw. ± 2 mm sind zum Nachweis der Mindestbetondeckung derzeit aus physikalischer Sicht nur magnetisch induktive Verfahren geeignet.

Anmerkung: Das DBV-Merkblatt bezieht sich explizit auf DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-2 und somit auf den Hochbau. Für Brücken und Ingenieurbauwerke ist ein gleichartiges DBV-Merkblatt nicht vorhanden.

Umfangreiche systematische **Untersuchungen zur erzielbaren Genauigkeit von Betondeckungsmessungen mit magnetisch induktiven Verfahren** sind in [19] veröffentlicht. Darin wird nachgewiesen, dass für die verwendeten marktüblichen Geräte **lediglich bei genau eingestelltem Durchmesser die geforderten Genauigkeiten** von ± 1 mm für Betondeckungen bis 40 mm und ± 2 mm **erzielt werden können** (Abbildung 7). Schon eine Abweichung um einen Normdurchmesser vom tatsächlich vorhandenen Durchmesser führt zu größeren Abweichungen.

Allerdings ist beim **Bauen im Bestand** i.d.R. der tatsächliche Durchmesser nicht genau bekannt. Abbildung 7 zeigt deutlich, dass eine Unkenntnis des genauen Durchmessers auch bei magnetisch induktiven Verfahren zu Abweichungen von bis zu 8 mm führen kann. **Berücksichtigt man die bei Unkenntnis des Durchmessers auftretenden Abweichungen, so können Multidetektoren beim Bauen im Bestand eine Alternative sein, weil sie keine Kenntnis des Durchmessers erfordern.** Wie groß die Abweichungen von Multidetektoren tatsächlich sind, ist derzeit Gegenstand der Forschung. **Werden bei Betondeckungen jenseits von 50 mm Genauigkeiten wie oben angegeben von ± 5 % erreicht, kann Radar je nach Genauigkeitsanforderungen der Prüfaufgabe eine Alternative sein.**

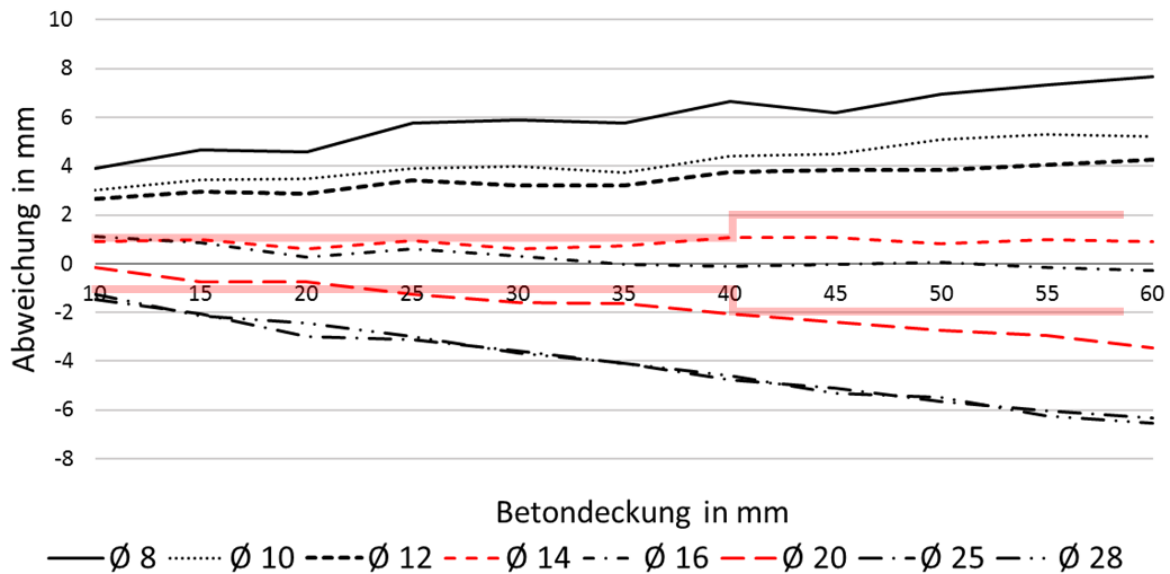


Abbildung 7: Systematische Abweichungen durch falsch eingestellten Bewehrungsdurchmesser; Einstellung im Gerät: $\varnothing 16$ mm; tatsächlich vorh. $\varnothing 8$ bis 28 mm; beispielhaft für Wirbelstromgerät mit absoluten Abweichungen in mm [19].

Die in [9] beschriebenen **Sonderverfahren** wie **Induktionsthermografie** bzw. **Durchstrahlungsprüfung** spielen in der Praxis keine Rolle und werden hier nicht weiter beschrieben.

Neben den umfangreichen Untersuchungen in [19] gibt es in der deutschsprachigen Fachliteratur nur wenige Veröffentlichungen. Die Veröffentlichung von *Hillemeier* [20, 21] aus dem Jahr 1989 war lange Jahre das Standardwerk für die Genauigkeit der Verfahren. Tiefer gehende Veröffentlichungen, die einen Überblick über die gängigen Verfahren geben, sind nicht deutschsprachig und auch nicht für den Anwenderkreis aus Bauingenieuren bestimmt (u. a. [22]). Gleichwohl haben die Anwendungen dieser Verfahren Eingang in die europäische Normung gefunden [19]. Daher wurden in der Forschung an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin Anstrengungen unternommen, die Möglichkeiten und Grenzen von klassischen magnetisch induktiven Betondeckungsmessungen zu erforschen und zu veröffentlichen [23].

2.6 Recherche geeigneter Testkörper

Da die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen bei **Radar** sehr stark abhängig ist von den Eigenschaften des Baustoffs, ist es erforderlich, Testkörper mit eingelegter Bewehrung zu betonieren. Dagegen spielt bei den **magnetisch induktiven Verfahren** der Baustoff keine Rolle, solange er keine magnetischen Eigenschaften besitzt (z. B. Stahlfaserbeton). Daher ist der Testkörperbau bei magnetisch induktiven Verfahren sehr viel einfacher. Da Beton und Luft hinsichtlich ihrer magnetischen Eigenschaften nahezu gleich sind, werden Bewehrungsstäbe einfach im entsprechenden Abstand in „Luft“ eingebracht. So

werden systematische Untersuchungen i.d.R. in entsprechenden Holzkisten durchgeführt, bei denen die Stäbe mit einer möglichst präzisen Betondeckung eingelegt werden. **Daher finden sich für magnetisch induktive Verfahren gegenüber Radar kaum dokumentierte Testkörper. Darum konzentriert sich die Recherche primär auf Testkörper zum Einsatz von Radar.**

Testkörper werden häufig für interne Zwecke verwendet, so dass sie kaum in Publikationen zu finden sind. Bei **Forschungsinstitutionen** existiert z. B. an der BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung), in dem mit ZfPBau befassten Fachbereich eine **interne Testkörperdatenbank**, die zur Konzeption von Untersuchungen verwendet wird. Der Inhalt dieser Datenbank ist nicht öffentlich. In [24] wurden Testkörper dieser Datenbank im Hinblick auf die Konzeption eines großformatigen Testkörpers für Ultraschall und Radar gesichtet. Der im Rahmen dieser Arbeit erstellte Testkörper ist jedoch primär zur Ermittlung der inneren Struktur (Rückwand und Hüllrohr aus Kunststoff) ausgelegt und spielt für die Prüfaufgabe der Betondeckung eine untergeordnete Rolle.

Den Verfassern sind weitere **Testkörper bei Geräteherstellern** bekannt, die jedoch als vertraulich eingestuft werden und an dieser Stelle nicht weiter behandelt werden.

Ebenfalls als vertraulich eingestuft ist die Offenlegung der **Testkörper**, die **im Rahmen der Ausbildung** verwendet werden. So existieren an den vom VFIB zugelassenen Ausbildungsstandorten zur Weiterbildung von Brückenprüfern im Bereich ZfPBau (Feuchtwangen, Lauterbach und an der HTW in Berlin) Testkörper, die im entsprechenden, nicht öffentlichen, Ausbildungshandbuch dokumentiert sind. Diese Testkörper sind vom Grundkonzept zwar gleich, unterscheiden sich jedoch in Ausführung und Genauigkeit von Standort zu Standort. Für die Prüfaufgaben Bewehrungsart und Betondeckungsmessung wird u.a. der in Abbildung 8a dargestellte Testkörper verwendet. Seine Systematik, bestehend aus fünf abgetreppten Bewehrungslagen, ist in Abbildung 8b dargestellt. In [25] werden die Abweichungen der tatsächlichen Betondeckungen des Testkörpers angegeben. Diese waren so hoch, dass im Vorfeld und für dieses Vorhaben neue Testkörpersätze mit deutlich verbesserter Präzision der realisierten Betondeckungen hergestellt wurden.



(a)



(b)

Abbildung 8: (a) Beispiel für einen in der Ausbildung verwendeten Testkörper zur Betondeckungsmessung (b) das zugrundeliegende Konzept [26].

3 Ergebnisse der vergleichenden Untersuchungen (AP2)

3.1 Konzeption und Herstellung von Testkörpern (AP2a)

Voruntersuchungen an der HTW:

Im Zuge von Masterarbeiten an der HTW zu den Themen Radar und Ultraschall wurden im Sommer 2017 erste Testkörper zur Betondeckungsmessung konzipiert und hergestellt [25, 27]. Dabei wurde das Hauptaugenmerk auf den präzisen Einbau von Bewehrungsstäben zur Erzielung einer sehr genau bestimmbaren, tatsächlichen Betondeckung gelegt. Diese Erkenntnisse standen zu Beginn des Vorhabens im September 2017 zur Verfügung und werden zur Herstellung der Testkörper im Zuge von AP2b verwendet und nachfolgend dargestellt.

Für eine maßgenaue Testkörperherstellung wurden folgende Erfordernisse herausgearbeitet:

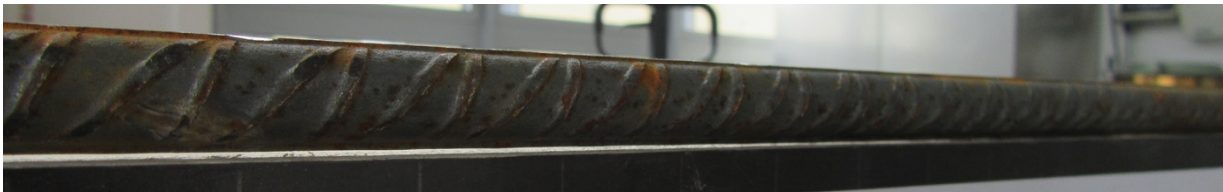
- Geradbiegen und Richten der aus dem Werk gelieferten Bewehrungsstäbe und -matten (Abbildung 9a und b)
- Zuschneiden der Schalungsplatten mit einer Formatkreissäge
- Millimetergenaue Anordnung der Bewehrungsstäbe durch Bohren der Löcher in die Schalung (Abbildung 9c)
- Mechanismus zum Ausrichten der Stäbe zur einheitlichen Lage der Rippung (abgebogene Stabenden Abbildung 9d)

Die gelieferten Bewehrungsstäbe vom Produktionswerk sind in der Regel in sich gekrümmt. Die für den Testkörperbau verwendeten Bewehrungsstäbe wiesen Abweichungen von ca. ± 3 mm auf einer Länge von 60 cm auf (Abbildung 9a). Diese wurden gerichtet und verblieben danach mit einer Verformung von ca. ± 1 mm (Abbildung 9b). Um sie anschließend millimetergenau im Schalungskörper anordnen zu können, wurden Löcher in die Schalungsplatten gebohrt (Abbildung 9c). Nach Einschieben der Bewehrung wurden die Stabenden abgebogen und nachfolgend mit Schrauben auf der Außenhaut der Schalplatten zusätzlich fixiert (Abbildung 9d), damit die exakte Lage der Rippen auf dem Stahl nicht, ggf. durch Bewegen der Schalung oder während des Betonierens verändert wird.

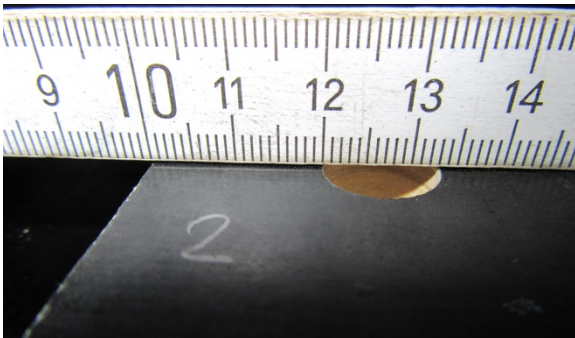
Während in der Baupraxis auf die Ausrichtung der Rippen der Bewehrung nicht geachtet wird, wurden für die Testkörper die **Bewehrungsstäbe mit der Rippenmitte nach oben angeordnet**, um Reflektoren in einheitlicher Tiefe und Ausrichtung messen zu können. Ebenso dient diese Anordnung zur Reduzierung der Abweichungen der Betondeckung und zur besseren Vergleichbarkeit der Betondeckungen untereinander, weil alle Bewehrungsstäbe auf die gleiche Weise angeordnet wurden.



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 9: Bewehrungsstab (a) vor und (b) nach dem Ausrichten. (c) Millimetergenaues Setzen von Bohrungen zum Einpassen der Bewehrungsstäbe. (d) Abgebogene Stabenden zum Ausrichten der Stäbe, so dass die Rippung immer genau gleich ausgerichtet ist.

Der Testkörper HTW-TK1 in Abbildung 10 stand somit bereits zu Beginn des Vorhabens zur Verfügung und wurde zur Maximierung des Zeitraums der langfristigen Messungen für AP2b verwendet. Bei der Konstruktion dieser Testkörper standen folgende Anforderungen im Vordergrund:

- möglichst viele unterschiedliche Betondeckungen in 10-mm-Schritten → 20 – 90 mm
- oberflächennah unbewehrter Bereich
- handelsüblicher Bewehrungsstabdurchmesser $\varnothing 12$ mm
- ausreichender, messfeldfreier Randabstand
- maßgenaue Herstellung auf ± 1 mm (realisiert wurde $\pm 0,5$ mm)

Auf einen dicht bewehrten oberflächennahen Bereich wurde bei diesem Testkörper bewusst verzichtet, da für die Fragestellung der Änderung der Permittivität (Betonfeuchte, Ausbreitungsgeschwindigkeit) eine gute und kontinuierliche Detektion der Stäbe wichtig ist.

Um möglichst viele Betondeckungen zu erhalten, erfolgte die **Anordnung von acht Bewehrungsstäben mit einem Durchmesser von 12 mm abgetreppt in 10 mm-Schritten mit einem Achsabstand von 15 cm**. Die kleinste Betondeckung beträgt für den Testkörper HTW-TK1 20 mm. Als messfeldfreier Rand wurden 20 cm angesetzt, um Randeffekte zu minimieren und das Ansetzen der Prüfgeräte zu erleichtern.

Die Auswahl der Betongüte erfolgte unter der Berücksichtigung von zwei Aspekten. Zum einen sollten baustoffbedingten Störeffekte (z. B. Strukturrauschen) minimiert und zum anderen reale Bedingungen aus der Praxis, durch Einsatz häufig verwendetem Betons sichergestellt werden. Der Beton wurde unter der Annahme gewählt, dass es sich um ein Außen- als auch ein Innenbauteil handeln kann. Der Fokus lag dabei auf Brücken bzw. frei bewitterten Bauteilen. Anhand dieser Kriterien wurden folgende Parameter ermittelt:

- Bewehrungskorrosion XC4
- Betonkorrosion XF3
- w/z Wert = 0,5

Für den Beton wurden ein CEM III 42,5 L mit dem Größtkorn 16 gewählt.

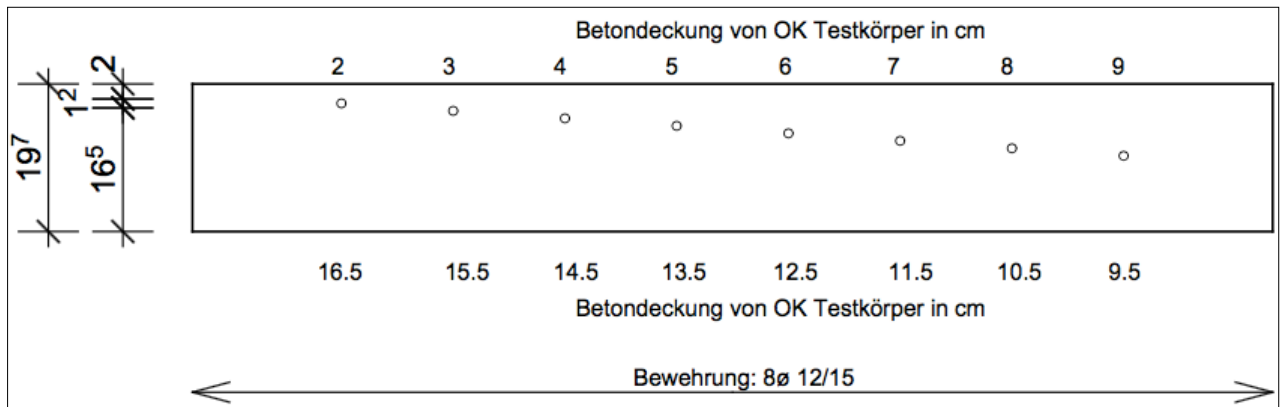


(a)



(b)

Abbildung 10: Testkörper HTW-TK1 (a) aufrecht und (b) Position zum Messen beider Seiten.



(a)



(b)

Abbildung 11: (a) Konstruktionszeichnung Längsschnitt HTW-TK1 mit präzise eingelegten Bewehrungsstäben ohne oberflächennahe Bewehrung; (b) fertig hergestellter Testkörper HTW-TK1.

Im Zuge von AP2a hergestellte Testkörper:

Auf der Basis der Erkenntnisse, die bei der Herstellung (Kap. 3.1) und Messung (Kap. 3.2) des Testkörpers HTW-TK1 gewonnen wurde, erfolgte die Konzeption des Testkörpers HTW-TK4, der im April 2018 hergestellt wurde. Folgende Punkte haben sich bewährt und werden genauso angewendet:

- Geradbiegen und Richten der aus dem Werk gelieferten Bewehrungsstäbe und -matten (Abbildung 9a und b)
- Zuschneiden der Schalungsplatten mit einer Formatkreissäge
- Millimetergenaue Anordnung der Bewehrungsstäbe durch Bohren der Löcher in die Schalung (Abbildung 9c)
- Mechanismus zum Ausrichten der Stäbe zur einheitlichen Lage der Rippung (abgebogene Stabenden, Abbildung 9d)

In Abbildung 12 ist ein Foto des fertig betonierten HTW-TK4 Testkörpers abgebildet. In der darauffolgenden Abbildung 13 sind Ausschnitte aus der in Anlage 2 angehängten Konstruktionszeichnung.



Abbildung 12: Testkörper HTW-TK4

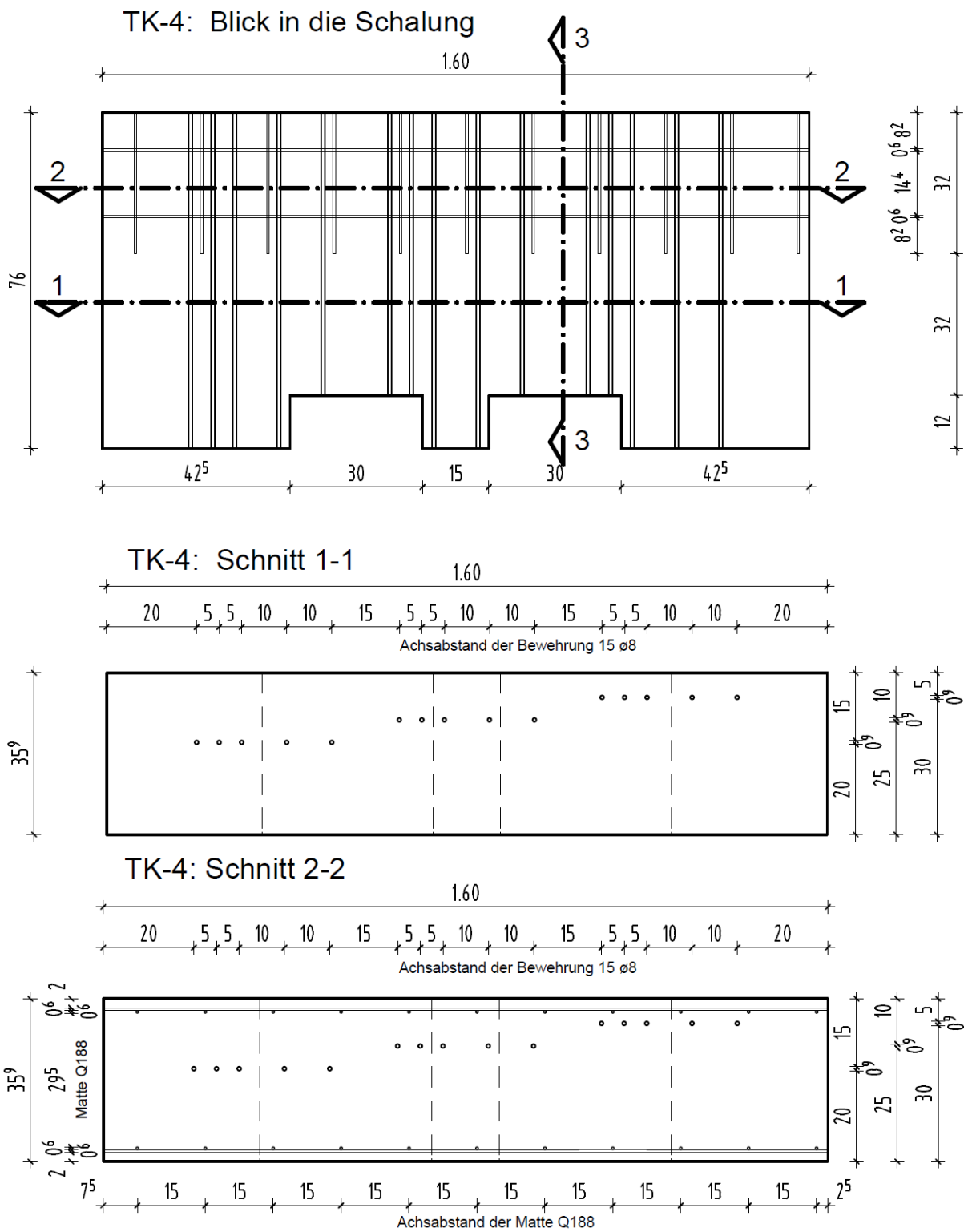


Abbildung 13: Konstruktionszeichnung HTW-TK4; siehe auch Anlage 2.

Während bei HTW-TK1 die Ermittlung der Detektionstiefe über der Zeit im Vordergrund steht, wird bei HTW-TK4 der getrennten Auflösung von benachbarten Stäben und der Einfluss dichtbewehrter Bereiche Aufmerksamkeit geschenkt. Daher wurden **jeweils fünf Bewehrungsstäbe** in **gleicher Tiefe** verbaut.

Wie Abbildung 14 dargestellt, bilden **die ersten drei Bewehrungsstäbe jeweils zwei Stababstände von 5 cm**, während **der dritte bis fünfte Bewehrungsstab jeweils zwei Stababstände von 10 cm bildet**. Von Interesse ist jeweils der Referenzstab in der Mitte (in Rot dargestellt), da sich jeweils nach links und rechts Bewehrungsstäbe mit gleichem Stababstand befinden.

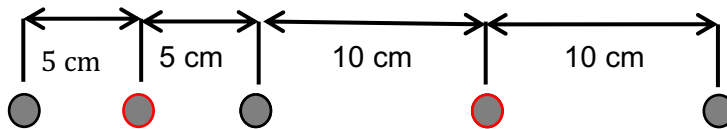


Abbildung 14: Systematik der Anordnung der Stäbe im TK HTW-TK4.

Der Systematik in Abbildung 14 folgend werden im HTW-TK4 **Betondeckungen von 5, 10 und 15 cm** von der einen Seite sowie **20, 25 und 30 cm von der gegenüberliegenden Seite** realisiert. Dadurch ergeben sich folgende **Verhältnisse von Betondeckung d_c zu Stababstand s_a (d_c/s_a)**:

- Betondeckung 5 cm mit $s_a = 5$ cm bzw. 10 cm $\rightarrow d_c/s_a = 1$ und 0,5
- Betondeckung 10 cm mit $s_a = 5$ cm bzw. 10 cm $\rightarrow d_c/s_a = 2$ und 1
- Betondeckung 15 cm mit $s_a = 5$ cm bzw. 10 cm $\rightarrow d_c/s_a = 3$ und 1,5
- Betondeckung 20 cm mit $s_a = 5$ cm bzw. 10 cm $\rightarrow d_c/s_a = 4$ und 2
- Betondeckung 25 cm mit $s_a = 5$ cm bzw. 10 cm $\rightarrow d_c/s_a = 5$ und 2,5
- Betondeckung 30 cm mit $s_a = 5$ cm bzw. 10 cm $\rightarrow d_c/s_a = 6$ und 3

Zusätzlich enthält der Testkörper HTW-TK4 einen Bereich **ohne oberflächennahe Bewehrung** und einen Bereich **mit oberflächennaher Bewehrung (Mattenbewehrung Q188)**, um den Einfluss dichtbewehrter Bereiche zu testen. Damit ergeben sich bei **sechs** verschiedenen Betondeckungen mit je **zwei** Verhältnissen d_c/s_a und einem bewehrten und einem unbewehrten Bereich insgesamt **24 Bereiche**.

Dabei wird das Verhältnis d_c/s_a **von 0,5 bis 3,0** in 0,5er-Schritten **und von 3,0 bis 6,0** in 1,0er-Schritten variiert. Bei Werten von $d_c/s_a > 1$ können benachbarte Stäbe gemäß [23] mit magnetisch induktiven Verfahren nicht mehr getrennt voneinander detektiert werden.

Für magnetisch induktive Geräte ist im DBV-Merkblatt „Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen“ [7, S. 47] eine Messtiefe von 100 mm vermerkt. Für das verwendete magnetisch induktive Gerät (Profometer PM-630, siehe Kapitel 3.2.1.2) und den hier gegebenen Betondeckungen und

Bewehrungsdurchmessern liegt die Detektionsgrenze bei 100 mm laut Herstellerangabe [28]. Bisher liegen Ergebnisse bis zu einer Betondeckung von 60 mm vor [23].

Damit erlaubt der Testkörper HTW-TK4 systematische Untersuchungen zur Detektion von Bewehrungsstäben jenseits der Anwendungsgrenzen von magnetisch induktiven Verfahren ($d_c > 5$ cm; $d_c/s_a > 1$). Um die Radarmessungen mit dem magnetisch induktiven Referenzverfahren zu überprüfen, wird demnach vorrangig der HTW-TK1 mit variierten Betondeckungen von 20 bis 90 mm verwendet. Folgende d_c/s_a Verhältnisse ergeben sich für den TK HTW TK-1 und stellen somit kein Problem zur getrennten Detektion des magnetisch induktiven Referenzverfahrens da:

- Betondeckung 2 cm mit $s_a = 15$ cm $\rightarrow d_c/s_a = 0,13$
- Betondeckung 3 cm mit $s_a = 15$ cm $\rightarrow d_c/s_a = 0,2$
- Betondeckung 4 cm mit $s_a = 15$ cm $\rightarrow d_c/s_a = 0,26$
- Betondeckung 5 cm mit $s_a = 15$ cm $\rightarrow d_c/s_a = 0,33$
- Betondeckung 6 cm mit $s_a = 15$ cm $\rightarrow d_c/s_a = 0,4$
- Betondeckung 7 cm mit $s_a = 15$ cm $\rightarrow d_c/s_a = 0,46$
- Betondeckung 8 cm mit $s_a = 15$ cm $\rightarrow d_c/s_a = 0,53$
- Betondeckung 9 cm mit $s_a = 15$ cm $\rightarrow d_c/s_a = 0,6$

Die Parametervariationen der Testkörper HTW-TK1 und HTW-TK4 sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Konstruktionspläne befinden sich in Anlage 1 und Anlage 2.

Tabelle 1: Parametervariationen der Testkörper

| | HTW-TK1 | HTW-TK4 |
|--|----------------------------------|--|
| Bewehrungsstäbe | 8 Ø12 mm | 15 Ø8 mm |
| Dicht bewehrte Bereiche | - | Unterscheidung in oberflächennah unbewehrten und oberflächennah bewehrten Bereich (Matte Q188, Betondeckung 20 mm) |
| Betondeckung | 20 – 90 mm in 10 mm-Schritten | 50 – 300 mm in 50 mm-Schritten |
| Verhältnisse von Betondeckung d_c zu Stababstand s_a (d_c/s_a) | 0,1 – 0,6 | 0,5 bis 3,0 in 0,5er-Schritten 3,0 bis 6,0 in 1,0er-Schritten |
| Bauteildicke d [cm] | 19,7 | 35,9 |
| Bauteillänge l [cm] | 1,45 | 1,60 |
| Bauteilbreite b [cm] | 50 | 76 |

3.2 Durchführung der Messungen an den hergestellten Testkörpern (AP2b)

3.2.1 Messgeräte

In den folgenden Kapiteln werden das verwendete Radargerät, die magnetisch induktiven Geräte und das Feuchtemessgerät vorgestellt.

3.2.1.1 Radarverfahren: Hilti PS 1000 X-Scan-System

Für die Untersuchungen der Radarmessungen wird das **Hilti PS 1000 X-Scan-System** verwendet (Abbildung 15). Das Gerät ist mit drei Bowtie-Antennen ausgestattet (Abbildung 15b). Bei der Aufnahme der Messdaten kommuniziert jede Antenne mit sich selbst sowie von Antenne zu Antenne, wodurch fünf Messspuren generiert werden (Abbildung 15c). Die Daten werden im Linienscanmodus („Detektion Aufnahme“) aufgenommen. Die maximale Detektionstiefe wird vom Hersteller für feuchten Beton auf 300 mm bzw. für trockenen Beton auf 400 mm angegeben und für Anwender auf 300 mm beschränkt [29]. Mit der **Herstellere Software „Hilti PROFIS Detection (2018)“** können zum einen größere Detektionstiefen erreicht werden und zum anderen die Rohdaten als **seg-y Dateien** ausgelesen werden. Dies wird in diesem Vorhaben so durchgeführt, um sie anschließend in die herstellerunabhängige **ReflexW** Software einlesen, bearbeiten und auswerten zu können. In den Rohdaten gibt es keine Detektionstiefenbeschränkung, wobei sich bei den hier vorliegenden Randbedingungen eine natürliche Beschränkung verfahrensbedingt von maximalen Detektionstiefen bis rd. 400 mm ergibt (vgl. HTW-TK4; Dicke = 359 mm).

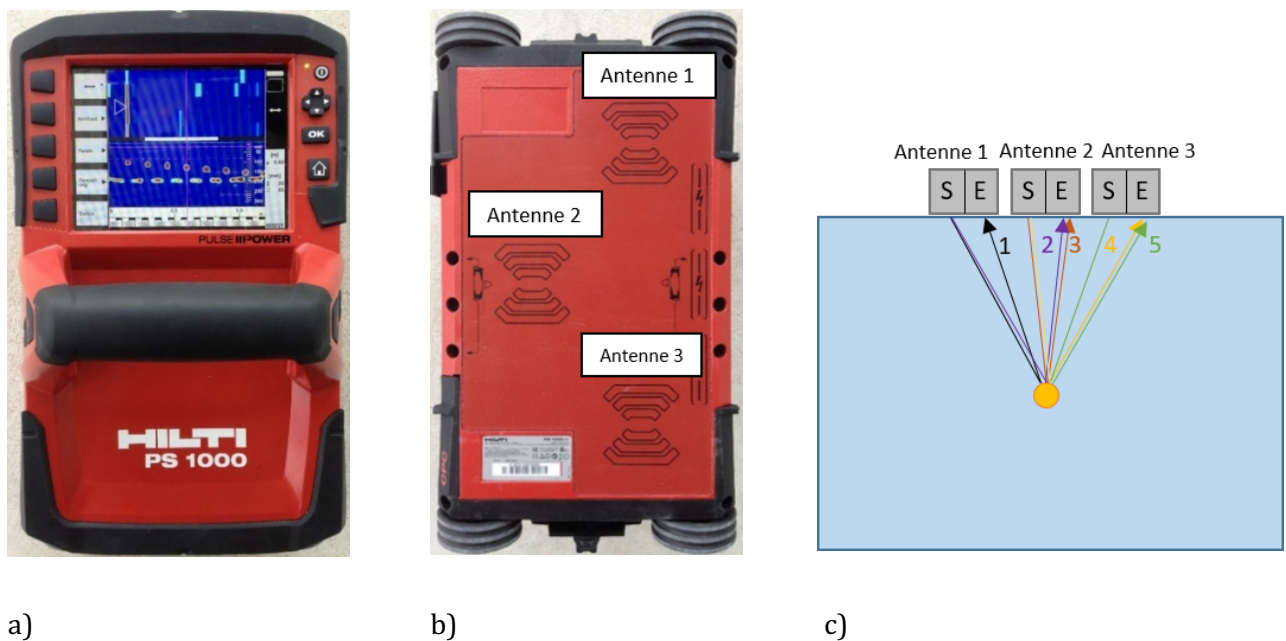


Abbildung 15: a) Hilti PS 1000 X-Scan System Vorderseite b) Hilti PS 1000 X-Scan System Rückseite mit Markierung der Bowtie-Antennen c) Kommunikation der Antennen fünf Bowtie-Antennen untereinander

3.2.1.2 Magnetisch induktive Referenzverfahren

3.2.1.2.1 Profometer PM-630

Zur Betondeckungsmessung verwendet man üblicherweise Geräte, die auf dem magnetisch induktiven Verfahren basieren, und damit als **Referenzverfahren** für die Radarmessungen verwendet wird. Das **Profometer PM-630 der Firma Proceq** (Abbildung 16) basiert auf dem magnetisch induktiven Verfahren mit hochfrequenter Anregung, was als **Wirbelstromverfahren** bezeichnet wird. Damit ist die Detektion von leitfähigen und ferromagnetischen Materialien möglich. Das verwendete Profometer PM-630 setzt sich zusammen aus einem Ausgabegerät und einer separaten Handsonde, die mit dem eigentlichen Messgerät verbunden wird. Die Handsonde besitzt verschiedene Spulenanordnungen, welche mehrere Magnetfelder erzeugen können. In dem Ausgabegerät können drei verschiedene Messbereiche in Abhängigkeit von der Betondeckung und dem Bewehrungsdurchmesser eingestellt werden: Standardsonde, Punktsonde und Tiefensonde. Für die Messbereichseinstellung wurde die Standardsonde gewählt, da sie laut Hersteller [28] die im DBV-Merkblatt „Betondeckung und Bewehrung“ [18] geforderten, gerätebedingten Abweichungen einhält. Diese lauten wie folgt:

- bis 40 mm Betondeckung $\leq \pm 1$ mm,
- 40 – 60 mm Betondeckung $\leq \pm 2$ mm.

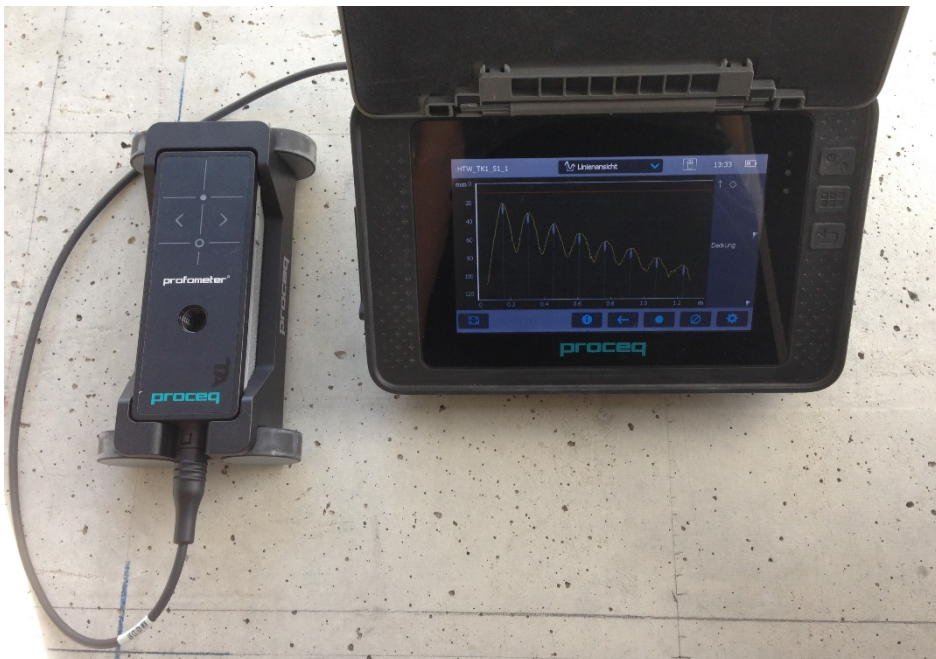


Abbildung 16: Profometer PM-630

Nach den Herstellerangaben gemäß Abbildung 17 lassen sich die Bewehrungsstäbe mit $\varnothing 8$ (HTW-TK4) und $\varnothing 12$ (HTW-TK1) bis in eine Tiefe von 110 mm detektieren. Die Abweichungen werden bis in eine Detektionstiefe von 50 mm mit einer Abweichung von ± 1 mm und bis in 100 mm mit einer Abweichung

von ± 2 mm, vom Hersteller angegeben (Abbildung 17) und erfüllen damit die Vorgaben von DBV Merkblatt [18].

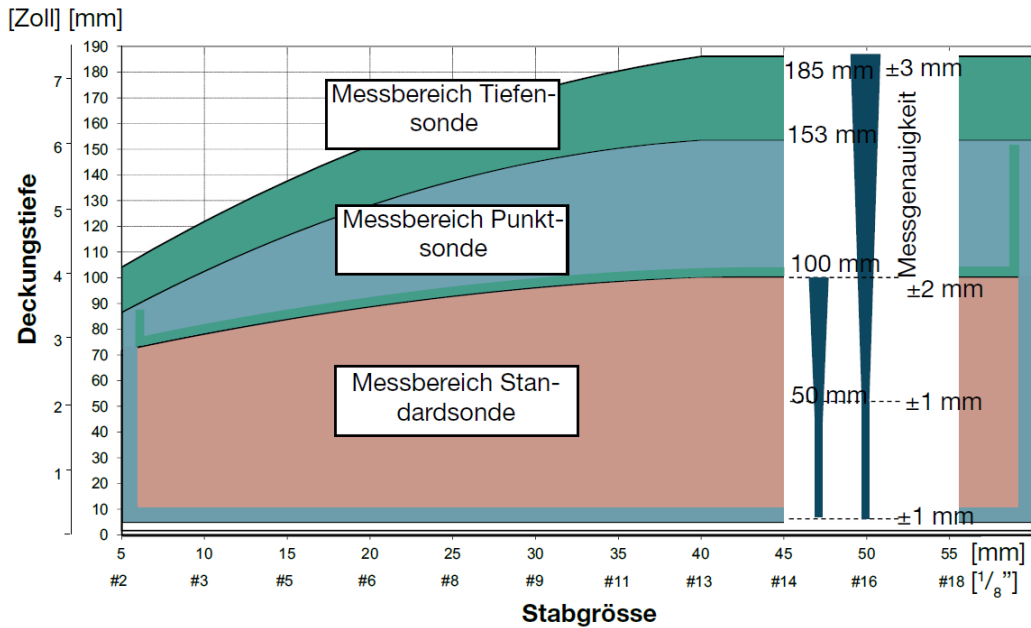


Abbildung 17: Messbereiche und deren Genauigkeit (Herstellerangaben gemäß [28]).

Abweichend gibt der Hersteller auf seiner Internetseite noch größere Abweichungen für das Gerät an. Die Messgenauigkeit wird mit $\pm 1 \dots 4$ mm, je nach Betondeckung angegeben [30].

| | Profometer 650 AI | Profometer 630 AI | Profometer 600 | Profoscope(+) |
|--|------------------------------------|---|--|-----------------------------------|
| Messbereich Deckung | Bis zu 185 mm | Bis zu 185 mm | Bis zu 185 mm | Bis zu 185 mm |
| Messgenauigkeit Deckung | ± 1 bis 4 mm, je nach Deckung | ± 1 bis 4 mm, je nach Deckung | ± 1 bis 4 mm, je nach Deckung | ± 1 bis 4 mm, je nach Deckung |
| Wegmessgenauigkeit auf glatter Oberfläche | 0,5 bis 1,0 % der gemessenen Länge | 0,5 bis 1,0 % der gemessenen Länge | 0,5 bis 1,0 % der gemessenen Länge | |
| Messbereich Durchmesser | Bis zu 63 mm | Bis zu 63 mm | Bis zu 63 mm | Bis zu 63 mm |
| Messgenauigkeit Durchmesser | ± 1 Bewehrungsstabgröße | ± 1 Bewehrungsstabgröße | ± 1 Bewehrungsstabgröße | ± 1 Bewehrungsstabgröße |
| Verfügbare Upgrades | Auf Profometer Corrosion | <ul style="list-style-type: none"> Auf Profometer 650 AI Auf Profometer Corrosion | <ul style="list-style-type: none"> Auf Profometer 630 AI/650 AI Auf Profometer Corrosion | Von Profoscope auf Profoscope+ |

Abbildung 18: Angabe der Messgenauigkeit für das Profometer auf der Internetseite [30]

Um den Einfluss von Nachbarstäben zu kompensieren, verfügt das Ausgabegerät über die Funktion der Nachbarstabskorrektur für Stababstände von 50...130 mm. Es kann entweder der Achsabstand eingegeben werden oder die Auto-Funktion zur Ermittlung des Stababstandes verwendet werden. Die Betondeckung an **HTW-TK1** wurde **ohne die Verwendung der Nachbarstabskorrektur**-Funktion gemessen, da die Nachbarstabskorrektur nach [23, 31] nur in einem Bereich von $s_a = 50...90$ mm sinnvoll ist. Der Testkörper **HTW-TK4** weist zwar ebenfalls Achsabstände von 50 und 100 mm auf, gleichzeitig ist die Betondeckung mit Werten von 50, 100, 150 mm usw. deutlich größer, weshalb hier die Betondeckung **unter Anwendung der Nachbarstabskorrektur** gemessen wurde. Hierbei wurde der Achsabstand manuell eingegeben. Von jeder Messfläche wurden fünf Messlinien aufgenommen, um anschließend eine statistische Auswertung machen zu können. Die Messungen wurden nach dem Messkonzept gemäß Tabelle 2 durchgeführt.

Tabelle 2: Messkonzept des magnetisch induktiven Referenzverfahrens

| HTW TK1 | HTW TK4 |
|---|---|
| <p>5x Linienmessung ohne Nachbarstabskorrektur</p> <ul style="list-style-type: none"> ➔ Durchmesser: 12 mm | <p>Oben, bewehrt (Matte Q188):</p> <p>5x Linienmessung mit Nachbarstabskorrektur</p> <ul style="list-style-type: none"> ➔ Durchmesser 1: 6 mm (Matte Q188) ➔ Durchmesser 2: 8 mm ➔ Stababstand 1: 15 cm (Matte Q188) ➔ Stababstand 2: 10 cm (großer Abstand) <p>5x Linienmessung mit Nachbarstabskorrektur</p> <ul style="list-style-type: none"> ➔ Durchmesser 1: 6 mm (Matte Q188) ➔ Durchmesser 2: 8 mm ➔ Stababstand 1: 15 cm (Matte Q188) ➔ Stababstand 2: 5 cm (kleiner Abstand) |
| | <p>Unten, unbewehrt:</p> <p>5x Linienmessung mit Nachbarstabskorrektur</p> <ul style="list-style-type: none"> ➔ Durchmesser 1: 8 mm ➔ Stababstand 1: 10 cm (großer Abstand) <p>5x Linienmessung mit Nachbarstabskorrektur</p> <ul style="list-style-type: none"> ➔ Durchmesser 1: 8 mm ➔ Stababstand 1: 5 cm (kleiner Abstand) |

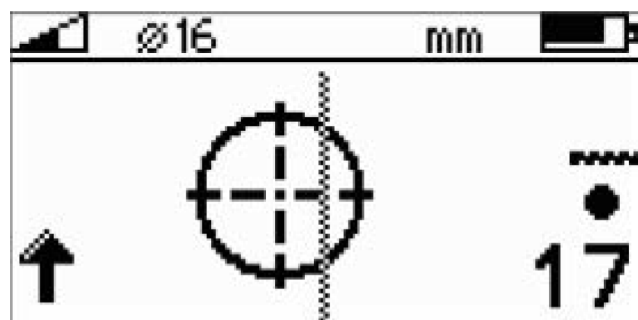
3.2.1.2 Profoscope

Damit die Messergebnisse des Profometers verglichen werden können, wurde ein zweites Gerät mit in die Messungen integriert. Das **Profoscope** der Firma Proceq basiert ebenfalls auf dem **Wirbelstromverfahren**, das hier als Referenzverfahren dienen soll. Es nutzt verschiedene Spulenanordnungen zur Erzeugung mehrere Magnetfelder. Um eine möglichst genaue Betondeckungsmessung zu erhalten, muss der bekannte Bewehrungsstabdurchmesser eingegeben werden.

Die Anzeige des Profoscopes ist einfacher gehalten als die des Profometers (Abbildung 19). Die Betondeckung kann nur als ganze Zahl im mm abgelesen werden und es ist keine Signalstärke ablesbar. Das Fadenkreuz über einem Mittelbalken markiert die senkrechte Position über dem Bewehrungsstab und die Position genau über der Stabmitte (im Fall eines Einzelstabs) wird durch ein rotes LED-Signal bestätigt. Der Radius des Primärmagnetfeldes beträgt ca. 200 mm, weshalb alle metallischen Gegenstände vor der Messung abzulegen sind, um Störungen zu verhindern.



a)



b)

Abbildung 19: a) Profometer PM-630 b) Profoscopedisplay beim Annähern eines Bewehrungsstabs [30]

Die erzielbare Detektionstiefe und die Abweichungen sind abhängig von den zu detektierten Bewehrungsstabdurchmessern. Die Bewehrungsstäbe mit $\varnothing 8$ (HTW-TK4) und $\varnothing 12$ (HTW-TK1) lassen sich gemäß Herstellerangaben nach Abbildung 20 bis in eine Tiefe von 70 mm ($\varnothing 8$) und 80 mm ($\varnothing 12$) detektieren. Bis in eine Tiefe von 50 mm mit einer Genauigkeit von bis zu ± 1 mm und bis in eine Tiefe von 100 mm mit einer Genauigkeit von ± 3 mm.

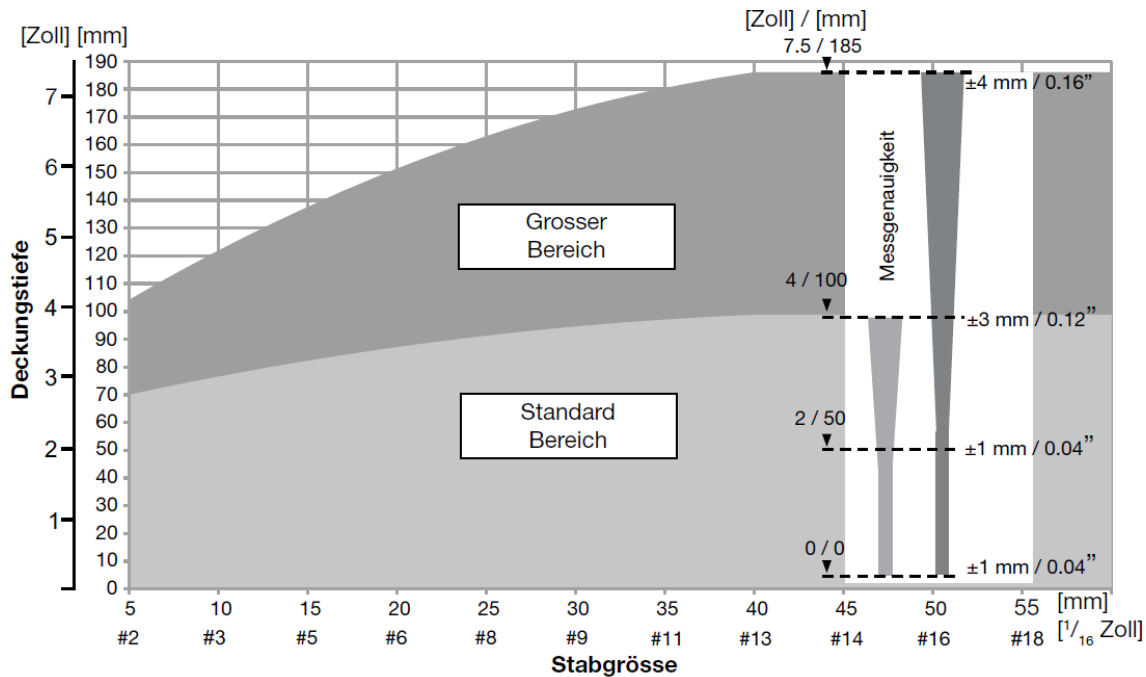


Abbildung 20: Messbereich und Abweichungen vom Profoscope (Herstellerangaben gemäß [32])

3.2.1.3 Feuchtemessgerät

Um den Feuchtigkeitsverlauf der Testkörper zu ermitteln, wird das zerstörungsfreie Verfahren der Kapazitätsmessung verwendet. Dies kommt wegen des geringen Aufwands auch vorrangig auf Baustellen zum Einsatz. Verwendet werden hierfür die **GANN Aktiv-Elektrode B 50** in Verbindung mit der **Hydromette M 4050**. Die Aktiv-Elektrode ist der Feuchtigkeits-Sensor zur Feststellung von der Feuchteverteilung in Baustoffen wie z. B. Beton. Bei der Kapazitätsmessung wird das feuchte Dielektrikum, in diesem Fall der feuchte Baustoff, bestimmt. Hierfür bildet sich das Messfeld zwischen der aktiven Kugel an der Geräteoberseite und der zu beurteilenden Untergrundmasse aus. Die Veränderung des elektrischen Feldes durch Material und Feuchte wird erfasst und auf der Anzeige des Messgerätes digital in Digits angezeigt. Die Messung ist eine relative Messung, d. h. es wird der Unterschied zwischen dem trockenen und dem feuchten Baustoff angezeigt. Demzufolge ist die Rohdichte des zu prüfenden Baustoffes eine der Einflussgrößen.



Abbildung 21: GANN Aktiv-Elektrode B 50 und Hydromette M 4050

3.2.2 Messstrategie

Feuchtemessungen

Zur Überwachung der Feuchtigkeitsentwicklung wurde die Hydromette M4050 in Verbindung mit der Aktiv-Elektrode B 50 (Kapitel 3.2.1.3) verwendet. Für die Ermittlung der Werte wurde an verschiedenen Messpunkten der Testkörper Messungen vorgenommen (Abbildung 22 und Abbildung 23). Der Testkörper HTW-TK1 wurde von einer Seite gemessen, der HTW-TK4 von der Vorder- und Rückseite, also insgesamt sechs Messpunkte. Dazu wurden an jeder Stelle drei Messwerte aufgenommen und aus ihnen der Mittelwert gebildet. Die drei bzw. sechs für HTW-TK4 erhaltenen Mittelwerte wurden nochmal gemittelt um einen Digitwert je Testkörper zu erhalten. Die Tabelle der Messwerte ist im Auswertungskapitel 3.3.1 enthalten.



Abbildung 22: Feuchtemesspunkte an HTW-TK1

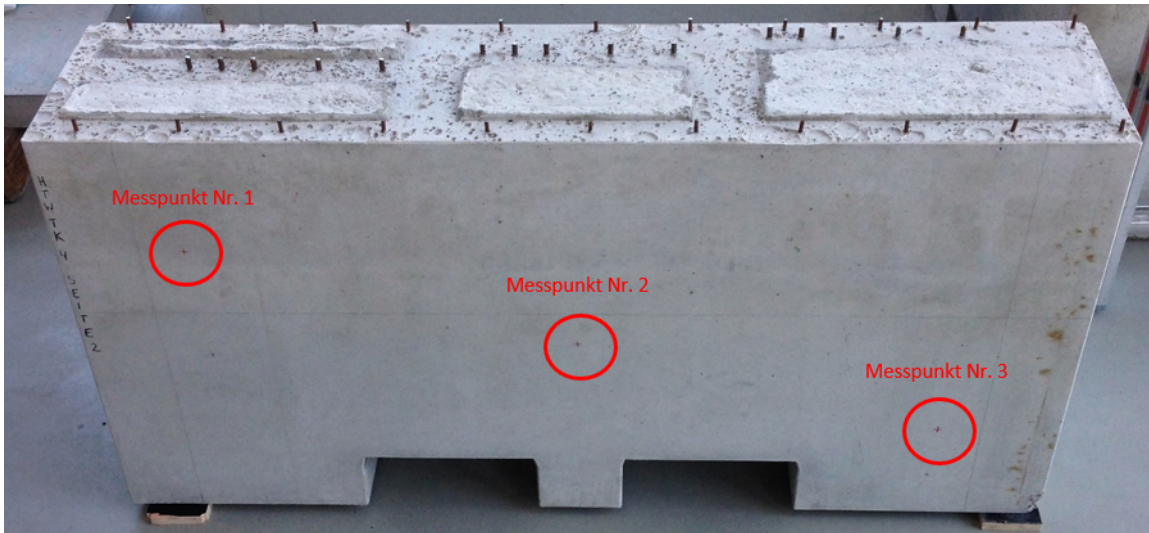


Abbildung 23: Feuchtemesspunkte an HTW-TK4; auf der anderen Seite wurden die Messpunkte ebenso angeordnet

Am Anfang der Messungen lagen keine genauen Erfahrungen bezüglich der zeitlichen Abstände der Wiederholungsmessungen vor, so dass an dem Testkörper HTW-TK1 erste Versuchsmessungen im Rahmen der Masterarbeit von Oliver Grudzio durchgeführt wurden [27]. Hier wurde die Feuchtigkeit des Testkörpers in einem zweiwöchentlichen Rhythmus in den ersten 60 Tagen gemessen und anschließend auf einen dreiwöchentlichen Rhythmus erhöht (Spalte 1 und 2 in Tabelle 3). Die fortlaufenden Feuchtemessungen in Spalte 3 und 4 der Tabelle 3 wurden im Rahmen dieses Forschungsvorhaben dokumentiert. Die Feuchtemessergebnisse am HTW-TK1 konnten für den HTW-TK4 genutzt werden. Durch die relativ zeitnahe Auswertung der Messdaten konnte festgestellt werden, dass sich die Permittivität und folglich die Ausbreitungsgeschwindigkeit innerhalb der ersten Wochen nach Herstellung der Testkörper erwartungsgemäß am schnellsten ändert. Durch diese Information wurde das Messintervall bei dem Testkörper HTW-TK4 in der ersten Woche nach der Betonage auf drei Tage festgelegt (Tabelle 4). Das Messintervall wurde erst vergrößert, nachdem sich das Ändern des Feuchtegehalts verlangsamte und somit auch die Detektionstiefe, welches durch die Auswertung der Messergebnisse ermittelt werden konnte. Somit nehmen die zeitlichen Abstände der einzelnen Messintervalle mit Alterung des Betons zu.

Tabelle 3: Messintervall HTW-TK1 über **15 Monate**

| Betonalter in Tagen | 0-59 | 59-102 | 102-130 | 130-450 |
|-----------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Messintervall | zweiwöchentlich | dreiwöchentlich | vierwöchentlich | sechswöchentlich |
| Radar- und Feuchtemessungen | | | | |

Tabelle 4: Messintervall HTW-TK4 über **7,5 Monate**

| | | | | | |
|--|-----------|-------------|-----------------|-----------------|------------------|
| Betonalter in Tagen | 0-7 | 7-45 | 45-77 | 77-105 | 105-224 |
| Messintervall Radar- und Feuchtemessungen | dreitägig | wöchentlich | zweiwöchentlich | vierwöchentlich | sechswöchentlich |

Radarmessungen

Für die Radarmessungen wurde an **HTW-TK1** auf der Seite mit den Betondeckungen von 20...90 mm **eine Messlinie** aufgenommen (Abbildung 24). An **HTW-TK4** wurde jeweils **eine Messlinie oben** im oberflächennah **bewehrten** Bereich und **eine unten** im oberflächennah **unbewehrten** Bereich aufgenommen (Abbildung 25) sowie auf der **Vorder- und Rückseite**, um alle Betondeckungen von 50, 100, 150, 200, 250, 300 mm zu erfassen (siehe Kapitel 3.1). Somit ergeben sich an HTW-TK4 **vier** Messlinien pro Messung.

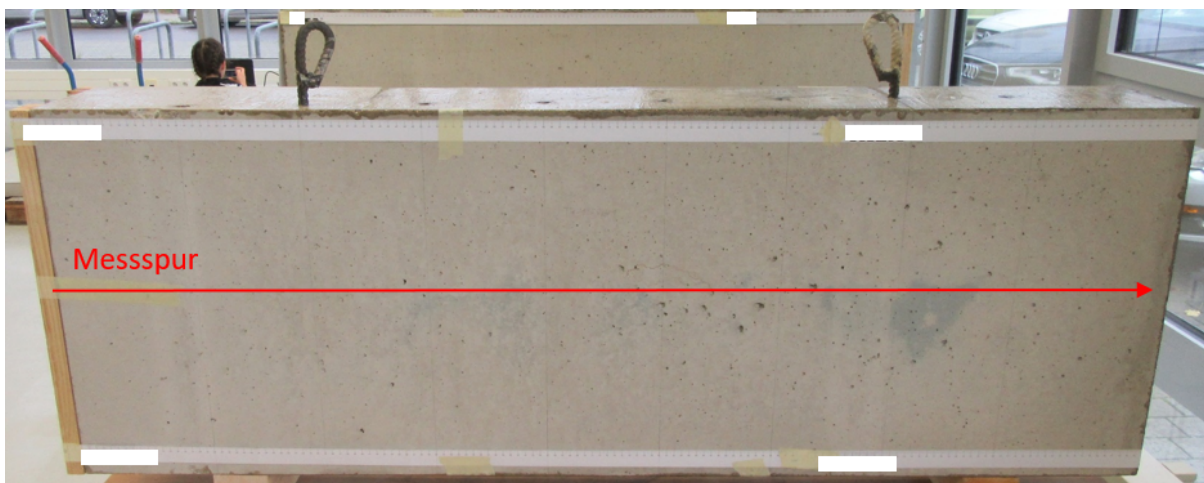


Abbildung 24: Messstrategie an HTW-TK1 – nur eine Messspur, da keine oberflächennahe Bewehrung vorhanden ist.

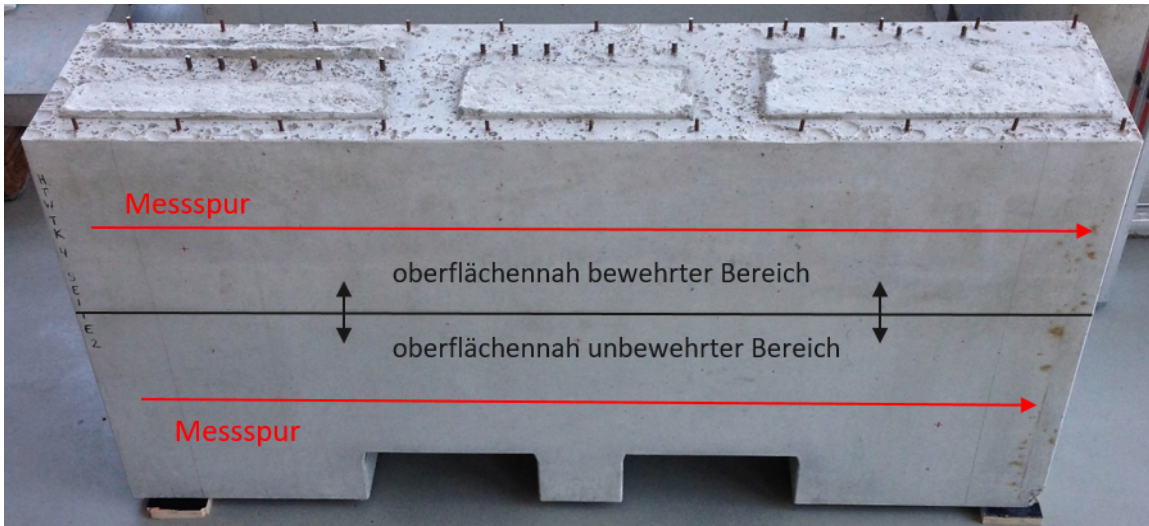


Abbildung 25: Messstrategie an HTW-TK4 – je 2 Messspuren auf Vorder- und Rückseite

3.3 Auswertung und Bewertung der Messergebnisse (AP2c)

Damit Messergebnisse verschiedener Geräte miteinander vergleichbar sind, müssen die Messergebnisse herstellerneutral dargestellt werden. Dazu müssen die Rohdaten auslesbar sein; dies ist für das verwendete Gerät (Hilti PS1000) mit Hilfe des seg-y-Datenformats möglich. Hierbei müssen die Bearbeitungsschritte (z.B. Nullpunktkorrektur, ggf. Filter oder Background-Removal usw.) gleichermaßen durchgeführt werden.

Für die Auswertung der hier gewonnenen Messergebnisse sind die derzeit verwendeten Bearbeitungsschritte von der Aufnahme der Messdaten bis zur Auswertung in einem Ablaufdiagramm zur besseren Übersichtlichkeit in Abbildung 26 dargestellt.

Die Arbeitsschritte zur Datenverarbeitung werden in Kapitel 3.3.3 beschrieben.

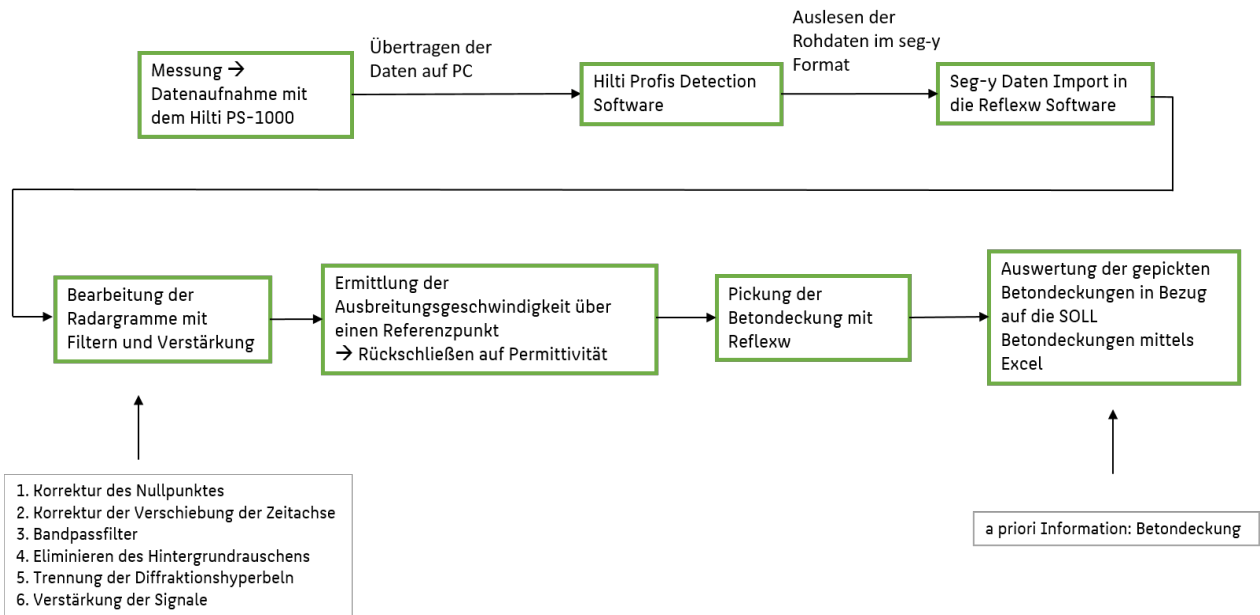


Abbildung 26: Auswertung als Ablaufdiagramm dargestellt

3.3.1 Entwicklung der Permittivität/Betonfeuchte

Die Feuchteentwicklung wurde mittels der kapazitiven Messung mit der Hydromette (Kapitel 3.2.1.3) überwacht. Der oberflächennah bewehrte Bereich bei HTW-TK4 macht sich nicht, wie in der Bedienungsanleitung [33, S. 77] angegeben, in den Messwerten bemerkbar. Daher werden alle Messwerte in die Mittelwertberechnung miteinbezogen. Die jeweils gemessenen Digits der beiden Testkörper befinden sich in Tabelle 5 und Tabelle 6.

Tabelle 5: Messwerte zur Feuchtemessung von HTW-TK1 mit der Hydromette in Digits

| Datum | 28.08.2017 | 08.09.2017 | 25.09.2017 | 12.10.2017 | 25.10.2017 | 15.11.2017 | 06.12.2017 | 03.01.2018 | 13.02.2018 | 28.03.2018 | 09.05.2018 | 15.06.2018 | 23.07.2018 | 27.08.2018 | 08.10.2018 | 19.11.2018 |
|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Permittivität ϵ | | 10,406 | 10,361 | 10,35 | 10,262 | 10,406 | 9,868 | 9,868 | 9,000 | 9,868 | 8,736 | 8,702 | 8,651 | 8,600 | 8,566 | 8,516 |
| Betonalter in Tagen | 0 | 12 | 29 | 46 | 59 | 80 | 102 | 130 | 171 | 214 | 256 | 293 | 331 | 366 | 408 | 450 |
| Messpunkt Nr. 1 | | 122 | 102 | 94 | 93 | 87 | 84 | 84 | 73 | 75 | 75 | 76 | 75 | 71 | 70 | 69 |
| | | 113 | 101 | 96 | 95 | 85 | 87 | 83 | 74 | 72 | 73 | 77 | 75 | 72 | 70 | 72 |
| | | 117 | 100 | 93 | 95 | 86 | 83 | 83 | 74 | 74 | 74 | 78 | 75 | 69 | 70 | 71 |
| Mittelwert MP Nr.1 | | 117 | 101 | 94 | 94 | 86 | 85 | 83 | 74 | 74 | 74 | 77 | 75 | 73 | 73 | 73 |
| Messpunkt Nr. 2 | | 115 | 100 | 90 | 90 | 85 | 85 | 83 | 74 | 72 | 72 | 76 | 72 | 73 | 70 | 71 |
| | | 117 | 104 | 91 | 91 | 86 | 86 | 78 | 76 | 74 | 73 | 75 | 73 | 72 | 71 | 67 |
| | | 116 | 103 | 90 | 90 | 87 | 83 | 80 | 75 | 75 | 76 | 76 | 74 | 73 | 71 | 70 |
| Mittelwert MP Nr.2 | | 116 | 102 | 90 | 90 | 86 | 85 | 80 | 75 | 74 | 74 | 76 | 73 | 73 | 71 | 69 |
| Messpunkt Nr. 3 | | 117 | 95 | 90 | 90 | 88 | 82 | 81 | 76 | 73 | 73 | 72 | 73 | 73 | 71 | 71 |
| | | 114 | 95 | 91 | 91 | 87 | 83 | 79 | 76 | 72 | 72 | 71 | 72 | 72 | 70 | 70 |
| | | 115 | 97 | 92 | 90 | 86 | 83 | 80 | 76 | 75 | 74 | 71 | 73 | 73 | 70 | 70 |
| Mittelwert MP Nr.3 | | 115 | 96 | 91 | 90 | 87 | 83 | 80 | 76 | 73 | 73 | 71 | 73 | 73 | 70 | 70 |
| Mittelwert aller MP | | 116 | 100 | 92 | 92 | 86 | 84 | 81 | 75 | 74 | 74 | 75 | 74 | 73 | 71 | 71 |
| Standardabweichung | | 1,02 | 3,53 | 2,14 | 2,31 | 0,58 | 1,15 | 1,84 | 1,17 | 0,19 | 0,51 | 2,96 | 1,26 | 0,19 | 1,45 | 1,90 |

Tabelle 6: Messwerte zur Feuchtemessung von HTW-TK4 mit der Hydromette in Digits

| Datum | 09.04.2018 | 12.04.2018 | 16.04.2018 | 26.04.2018 | 03.05.2018 | 09.05.2018 | 17.05.2018 | 24.05.2018 | 08.06.2018 | 25.06.2018 | 23.07.2018 | 27.08.2018 | 08.10.2018 | 19.11.2018 |
|--------------------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Permittivität ϵ | | 9,665 | 10,435 | 10,186 | 9,665 | 9,018 | 9,371 | 9,018 | 8,010 | 9,002 | 8,651 | 8,321 | 8,242 | 8,086 |
| Betonalter in Tagen | 0 | 3 | 7 | 17 | 24 | 30 | 37 | 45 | 60 | 77 | 105 | 140 | 182 | 224 |
| Seite 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| Messpunkt Nr. 1 | | 147 | 144 | 123 | 112 | 120 | 109 | 110 | 110 | 99 | 100 | 100 | 94 | 90 |
| | | 146 | 145 | 122 | 118 | 115 | 108 | 113 | 110 | 99 | 97 | 99 | 90 | 88 |
| | | 147 | 144 | 118 | 117 | 117 | 111 | 106 | 109 | 102 | 99 | 99 | 93 | 90 |
| Mittelwert MP Nr.1 | | 147 | 144 | 121 | 116 | 117 | 109 | 110 | 110 | 100 | 99 | 99 | 92 | 89 |
| Messpunkt Nr. 2 | | 147 | 143 | 129 | 115 | 110 | 110 | 111 | 107 | 98 | 98 | 100 | 90 | 87 |
| | | 146 | 144 | 127 | 116 | 113 | 114 | 112 | 108 | 102 | 100 | 96 | 91 | 91 |
| | | 147 | 144 | 119 | 114 | 116 | 110 | 113 | 109 | 105 | 102 | 98 | 89 | 90 |
| Mittelwert MP Nr.2 | | 147 | 144 | 125 | 115 | 113 | 111 | 112 | 108 | 102 | 100 | 98 | 90 | 89 |
| Messpunkt Nr. 3 | | 146 | 145 | 120 | 119 | 115 | 113 | 116 | 109 | 99 | 100 | 100 | 91 | 88 |
| | | 145 | 144 | 121 | 121 | 109 | 109 | 110 | 115 | 105 | 99 | 100 | 89 | 89 |
| | | 146 | 145 | 127 | 124 | 112 | 111 | 107 | 114 | 102 | 95 | 101 | 89 | 94 |
| Mittelwert MP Nr.3 | | 146 | 145 | 123 | 121 | 112 | 111 | 111 | 113 | 102 | 98 | 100 | 90 | 90 |
| Mittelwert aller MP | | 146 | 144 | 123 | 117 | 114 | 111 | 111 | 110 | 101 | 99 | 99 | 91 | 90 |
| Seite 2 | | | | | | | | | | | | | | |
| Messpunkt Nr. 1 | | 147 | 143 | 123 | 117 | 107 | 107 | 108 | 104 | 94 | 96 | 91 | 88 | 89 |
| | | 146 | 144 | 122 | 108 | 115 | 109 | 102 | 101 | 100 | 91 | 92 | 89 | 86 |
| | | 147 | 143 | 116 | 113 | 113 | 110 | 101 | 102 | 93 | 97 | 94 | 93 | 86 |
| Mittelwert MP Nr.1 | | 147 | 143 | 120 | 113 | 112 | 109 | 104 | 102 | 96 | 95 | 92 | 90 | 87 |
| Messpunkt Nr. 2 | | 147 | 143 | 124 | 116 | 107 | 110 | 98 | 95 | 96 | 90 | 92 | 86 | 84 |
| | | 145 | 144 | 116 | 108 | 117 | 106 | 103 | 101 | 99 | 95 | 87 | 85 | 87 |
| | | 148 | 143 | 119 | 113 | 113 | 112 | 105 | 97 | 95 | 98 | 93 | 81 | 87 |
| Mittelwert MP Nr.2 | | 147 | 143 | 120 | 112 | 112 | 109 | 102 | 98 | 97 | 94 | 91 | 84 | 86 |
| Messpunkt Nr. 3 | | 146 | 142 | 120 | 110 | 113 | 108 | 109 | 102 | 98 | 93 | 90 | 86 | 87 |
| | | 147 | 144 | 125 | 118 | 108 | 114 | 101 | 101 | 100 | 96 | 95 | 86 | 87 |
| | | 147 | 141 | 123 | 115 | 107 | 110 | 106 | 103 | 97 | 91 | 94 | 88 | 86 |
| Mittelwert MP Nr.3 | | 147 | 142 | 123 | 114 | 109 | 111 | 105 | 102 | 98 | 93 | 93 | 87 | 87 |
| Mittelwert aller MP | | 147 | 143 | 121 | 113 | 111 | 110 | 104 | 101 | 97 | 94 | 92 | 87 | 87 |
| gesamter Mittelwert beider TK Seiten | | 147 | 144 | 122 | 115 | 113 | 110 | 107 | 105 | 99 | 97 | 96 | 89 | 88 |
| Standardabweichung | | 0,87 | 1,00 | 3,33 | 3,76 | 3,89 | 2,46 | 3,61 | 2,87 | 2,57 | 2,93 | 2,45 | 3,26 | 1,33 |

Der jeweilige Gesamtmittelwert eines Messtages aus den Tabelle 5 und Tabelle 6 ist in Abbildung 28 als Diagramm der Feuchtigkeitsentwicklung dargestellt. Zusätzlich zum dargestellten Gesamtmittelwert als Messpunkt ist jeweils die ermittelte einfache Standardabweichung aus neun Einzelwerten der jeweils drei Messpunkte als Fehlerindikator angegeben. Die Einteilung der unterschiedlichen Feuchtebereiche von sehr trocken bis nass stehen im Zusammenhang zu der Betonrohddichte und wurden der Gebrauchsanweisung der Hydromette entnommen (Abbildung 27).

| Rohwichte kg/m ³ | Entsprechende relative Luftfeuchte | | | | | |
|--------------------------------|------------------------------------|----------------|--------------|----------|-------------|----------|
| | 30 — 50 — 70 — 80 — 90 — 95 — 100 | | | | | |
| | Anzeige in Digits | | | | | |
| | sehr trocken | normal trocken | halb-trocken | feucht | sehr feucht | nass |
| bis 600 | Okt 20 | 20 - 40 | 40 - 60 | 60 - 90 | 90 - 110 | über 100 |
| 600 bis 1200 | 20 - 30 | 30 - 50 | 50 - 70 | 70 - 100 | 100 - 120 | über 120 |
| 1200 bis 1800 | 20 - 40 | 40 - 60 | 60 - 80 | 80 - 100 | 110 - 130 | über 130 |
| über 1800 | 30 - 50 | 50 - 70 | 70 - 90 | 90 - 120 | 120 - 140 | über 140 |

Abbildung 27: Anzeigewerte (Digits) der GANN Hydromette in Abhängigkeit von der Material-Rohdichte [33, S. 80]; Anmerkung: Spaltenüberschrift in der Gebrauchsanweisung falsch: anstatt Rohwichte ist die Rohdichte gemeint; ebenso ist in der ersten Zeile und ersten Spalte „Okt 20“ vermerkt, dies steht für „10-20“.

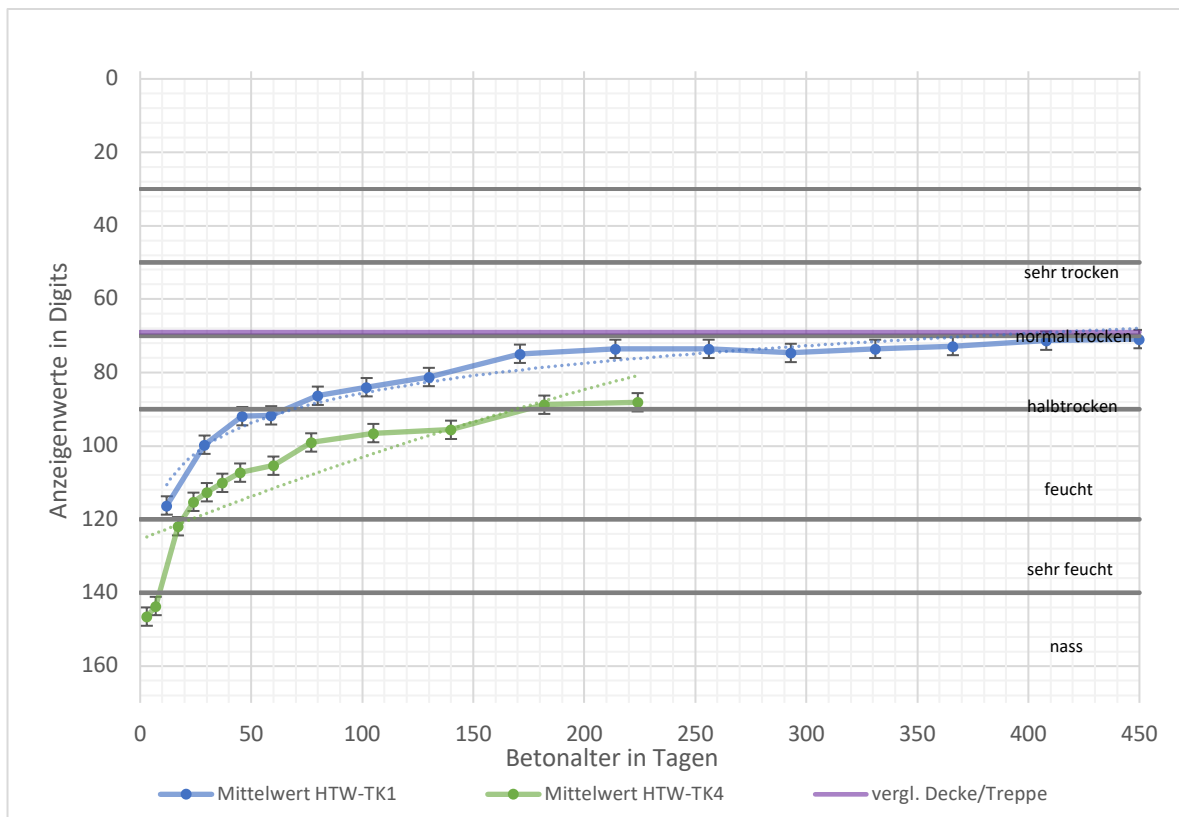


Abbildung 28: Entwicklung der Feuchtigkeit der Testkörper HTW-TK1 und HTW-TK4 nach Messung der Betonfeuchte mit der GANN Hydromette in Digits

Anhand der Änderung der relativen Messwerte beider Testkörper ist deutlich zu erkennen, dass sich eine nennenswerte Änderung der Betonfeuchtigkeit in den ersten 150 Tagen abspielt. Die stärkste Veränderung des Graphen ist innerhalb der ersten 45-50 Tage zu beobachten. Dies hängt mit der Hydratationsgeschwindigkeit des Betons zusammen, da innerhalb der ersten Zeit nach der Betonage viel freies Wasser vorhanden ist, welches durch die Hydratation gebunden wird. Die Betonfeuchte des HTW-TK1 pendelt sich nach 170 Tagen annähernd konstant bei ca. 75 Digits - im „halbtrockenen“ Bereich - ein. Zum Vergleich wurden die Digit-Werte einer etwa acht Jahre alten Decke/Treppe (69 Digits) aufgenommen und in das Diagramm eingepflegt. Somit ist zu erkennen, dass sich die Testkörper für den Empfindlichkeitsbereich der verwendeten GANN Hydromette wie ein langfristig hydratisiertes Bauteil verhalten.

In Abbildung 29 und Abbildung 30 sind die Diagramme der Entwicklung der Permittivität über der Zeit dargestellt: Für HTW-TK1 über einen Zeitraum von 15 Monaten und von HTW-TK4 über einen Zeitraum von 7,5 Monaten. Die Permittivität ϵ wurde durch den direkten Zusammenhang zur Ausbreitungsgeschwindigkeit ermittelt (siehe Kapitel 3.3.3.2). Zur besseren Veranschaulichung wurde eine logarithmische Trendlinie in den Diagrammen dargestellt.

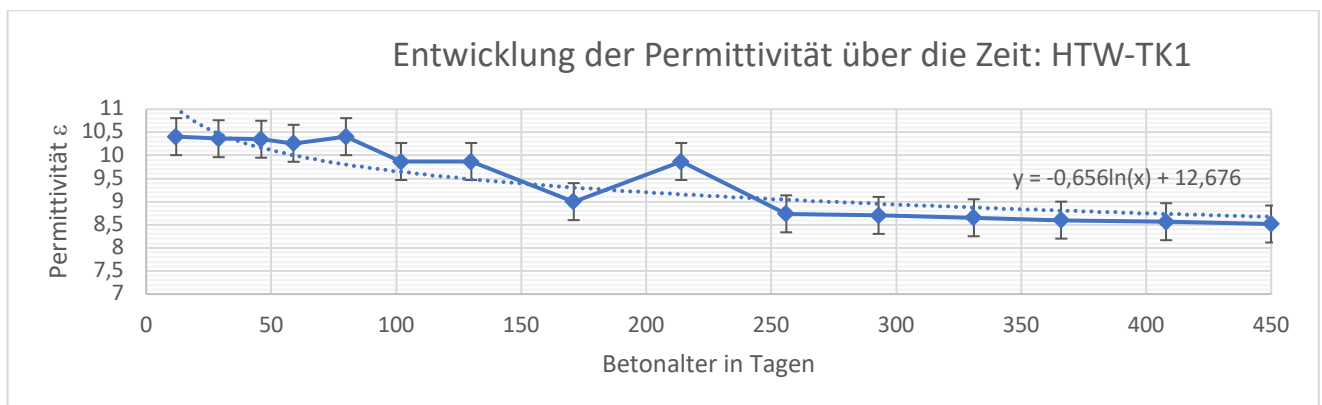


Abbildung 29: Entwicklung der Permittivität über die Zeit: HTW-TK1, Hilti PS 1000

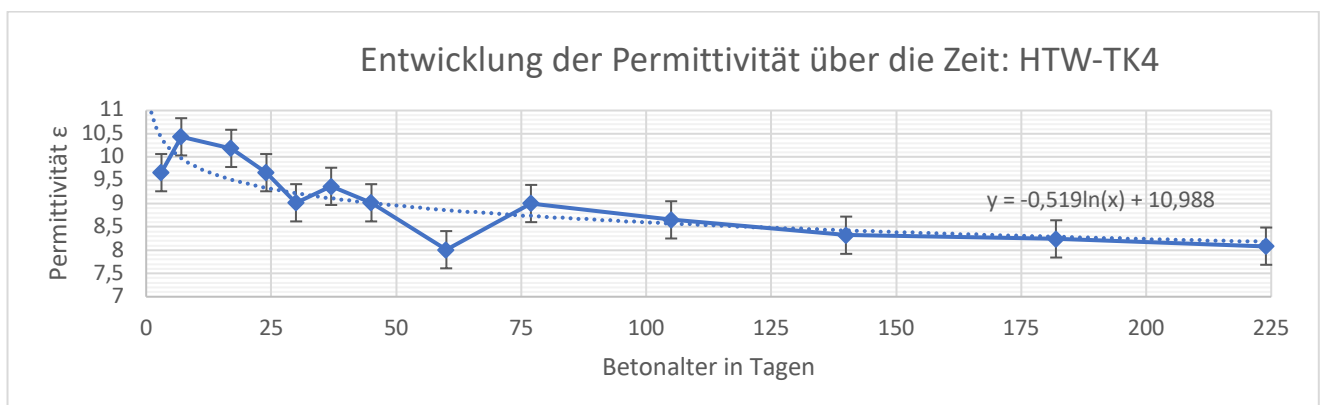


Abbildung 30: Entwicklung der Permittivität über die Zeit: HTW-TK4, Hilti PS 1000

Aus den beiden Diagrammen wird deutlich, dass die Permittivitäten des jungen Betons schwanken. Das kommt daher zu Stande, dass die ermittelten Permittivitäten zufällige Abweichungen enthalten. Um den Einfluss der Abweichung beim Picken der Laufzeiten für die Kalibrierung der Ausbreitungsgeschwindigkeit beurteilen zu können, wurde eine Messunsicherheitsbetrachtung angestellt (Kapitel 3.3.4). Die daraus resultierenden Abweichungen wurden als doppelte Standardabweichung mittels Fehlerindikatoren zu den Permittivitäten angegeben (Abbildung 29 und Abbildung 30). Es ist an beiden Testkörpern deutlich zu erkennen, dass nach dem der größte Teil der Austrocknung abgeschlossen ist, sich die Permittivitäten sich an die logarithmische Trendlinie angleichen.

3.3.2 Magnetisch induktives Referenzverfahren

Die Auswertung und der Vergleich (Kapitel 4) mit dem Referenzverfahren hinsichtlich der Betondeckung erfolgt nur anhand der Messergebnisse für **HTW-TK1**, da die Messergebnisse mit dem magnetisch induktiven Gerät am HTW-TK4 mit Betondeckungen oberhalb von 10 cm die zuvor erläuterten Detektionsgrenzen gemäß Kapitel 3.1 erreichen. Die Detektionsgrenzen an HTW-TK4 sind zum einem die nicht mehr sichere, getrennte Detektion von benachbarten Stäben mit dem Verhältnis von der Betondeckung d_c zu dem Stababstand s_a von $d_c/s_a >> 1$. Am HTW-TK4 könnten somit nur die ersten beiden Bewehrungsstäbe mit einer Betondeckung von 50 mm und einem Stababstand von 10 cm im oberflächennahen unbewehrten Bereich mit den Radarergebnissen verglichen werden (siehe Kapitel 3.1), da alle weiteren Verhältnisse von Betondeckung d_c zu Stababstand s_a größer 1 sind. Dies hat aber keine Auswirkungen auf die Auswertung, da der HTW-TK1 auch eine Betondeckung von 50 mm aufweist. Der weitere Grund, dass die Detektionsgrenze erreicht wird, ist das mit der nächst größeren Betondeckung des HTW-TK4 von 100 mm, die Messtiefe von magnetisch induktiven Geräten erreicht ist [7, S. 47]. Die beiden erläuterten Detektionsgrenzen wurden am HTW-TK4 mit Messungen überprüft und sind nach wie vor gültig. Es wurden an diesem Testkörper nur vereinzelt und inkonsequent Bewehrungsstäbe detektiert, welche zudem große, nicht tolerierbare Abweichungen aufwiesen. Beispielsweise entstanden bei einer Betondeckung von 100 mm Abweichungen von bis zu ± 16 mm (siehe Anlage 3).

Die Messungen an HTW-TK1 wurden als Linienmessungen aufgenommen. In Abbildung 31 ist eine exemplarische Linienmessung ohne Verwendung der Nachbarstabskorrektur dargestellt.

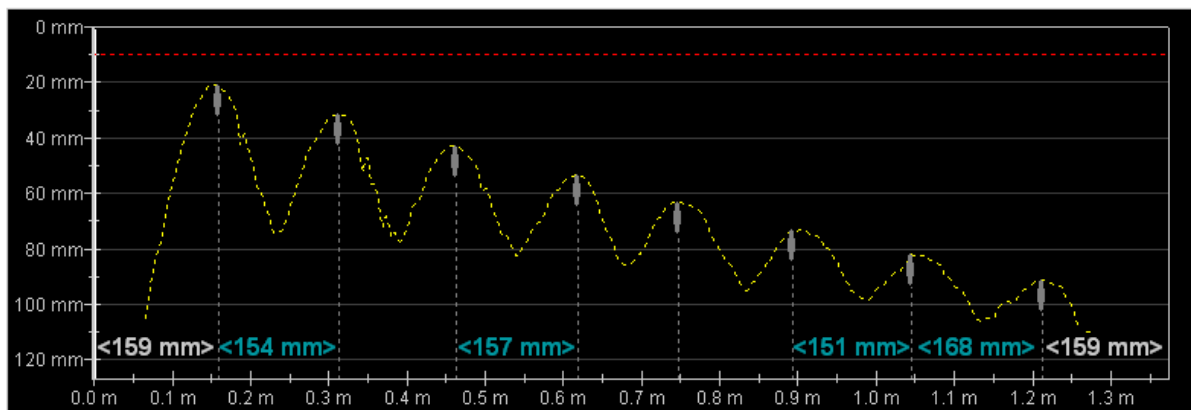


Abbildung 31: exemplarische Profometer PM-630 Messung an HTW-TK1

Im Anschluss an die Messungen wurden die gemessenen Betondeckungen zur Auswertung in Excel übertragen (Tabelle 7). Es wurde der Mittelwert der fünf Messlinien sowie die Standardabweichung ermittelt. Anschließend wurden die zulässigen Abweichungen der Betondeckungen nach DBV-Merkblatt [18] eingearbeitet.

Tabelle 7: Profometer PM-630 Messungen an HTW-TK1 (Betondeckungen in mm)

| Stab-Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Soll [mm] | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| Messspur Nr.1 [mm] | 21 | 31 | 43 | 53 | 63 | 73 | 82 | 91 |
| Messspur Nr.2 [mm] | 21,0 | 31,1 | 43,2 | 53,7 | 62,5 | 70,5 | 81,0 | 89,6 |
| Messspur Nr.3 [mm] | 21,0 | 30,9 | 42,9 | 53,2 | 62,6 | 72,3 | 79,9 | x |
| Messspur Nr.4 [mm] | 21,0 | 31,1 | 43,0 | 53,5 | 62,9 | 71,4 | 81,3 | 89,3 |
| Messspur Nr.5 [mm] | 21,0 | 31,2 | 43,0 | 53,2 | 62,7 | 72,8 | 81,9 | 87,8 |
| Mittelwert | 21,0 | 31,1 | 43,0 | 53,4 | 62,7 | 72,0 | 81,2 | 89,5 |
| absolute Abweichung | 1,0 | 1,1 | 3,0 | 3,4 | 2,7 | 2,0 | 1,2 | -0,5 |
| Standardabweichung | 0,0 | 0,1 | 0,1 | 0,2 | 0,2 | 1,0 | 0,8 | 1,2 |

Bei HTW-TK1 konnten mit dem magnetisch induktiven Referenzverfahren alle Bewehrungsstäbe mit den Betondeckungen 20 – 90 mm, d. h. acht verschiedene Betondeckungen, detektiert werden (Tabelle 7). Die größte, absolute Abweichung von + 3,4 mm ist bei einer Betondeckung von 50 mm festzustellen. Diese Abweichungen sind nicht mehr als zufällig zu erklären, sondern deuten auf systematische Abweichungen hin, wie aus dem Diagramm in Abbildung 32 zu erkennen ist.

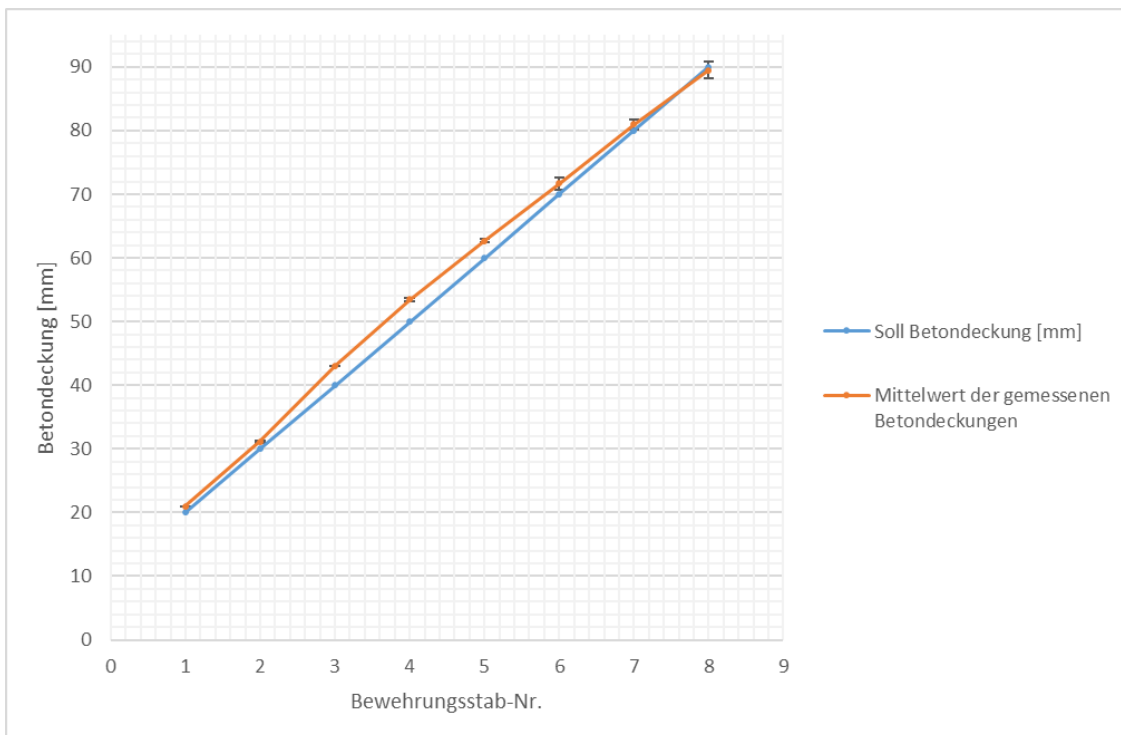


Abbildung 32: Mittelwerte der gemessenen Betondeckungen im Vergleich zur Soll Betondeckung der einzelnen Bewehrungsstäbe am HTW-TK1

Das Diagramm in Abbildung 33 zeigt die absoluten Abweichungen des jeweiligen Mittelwerts im Vergleich zu den zulässigen Abweichung nach DBV Merkblatt [18]. Die absoluten Abweichungen der Betondeckung von 30 – 60 mm liegen außerhalb der zulässigen Abweichungen nach DBV Merkblatt.

Die Forschungsergebnisse aus dem Bericht „Messung und Auswertung der Bewehrungsüberdeckung“ [34] des schweizerischen Bundesamtes für Straßen legen ebenfalls Überschreitungen der Genauigkeitsanforderungen des DBV-Merkblatts [18] mit dem Profometer PM-630 nah. Dort wurden die Genauigkeitsanforderungen mit den **magnetisch induktiven Verfahren** ebenfalls überprüft und festgestellt, dass selbst unter idealen Randbedingungen die Genauigkeitsanforderungen des DBV-Merkblattes bzw. auch die Angaben der Gerätehersteller nicht eingehalten werden.

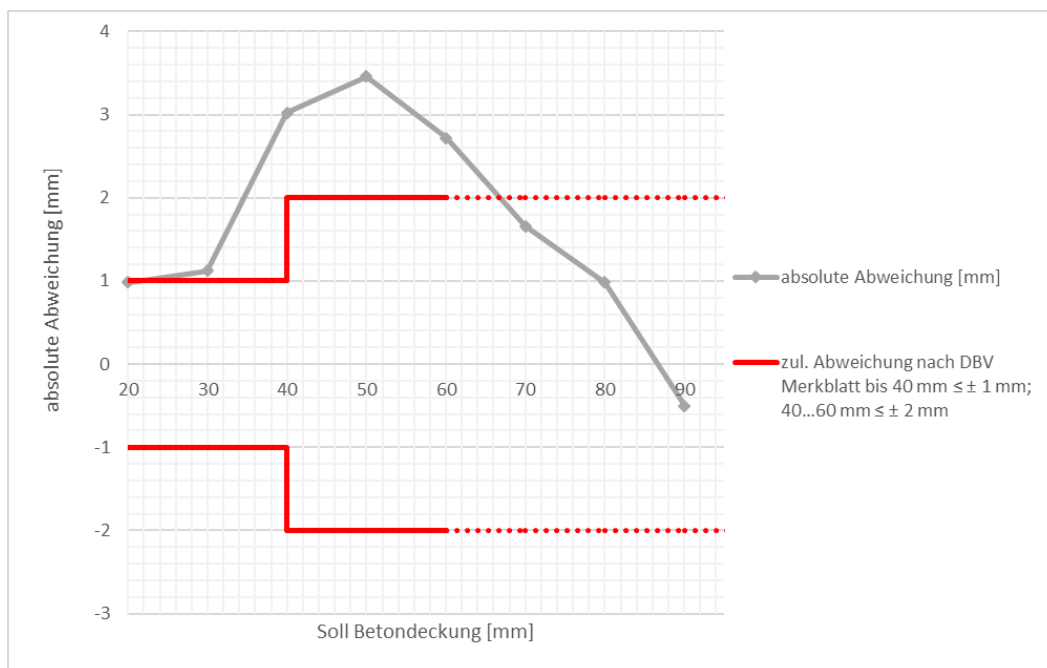


Abbildung 33: absolute Abweichung von der Soll Betondeckung am HTW-TK1; Profometer PM-630

Da die Abweichungen des Profometers PM-630 außerhalb der zulässigen Abweichung des DBV-Merkblatts liegen, wurden die Betondeckungen mit einem weiteren Gerät, dem Profoscope (Kapitel 3.2.1.2.2), welches auch auf dem magnetisch induktiven Verfahren basiert, überprüft. Die Messergebnisse sind der Tabelle 8 zu entnehmen.

Tabelle 8: Profoscope Messungen an HTW-TK1 (Betondeckungen in mm)

| Stab-Nr. | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Soll [mm] | 20 | 30 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 90 |
| Messspur Nr.1 [mm] | 20 | 30 | 41 | 51 | 60 | 70 | 78 | 87 |
| Messspur Nr.2 [mm] | 20 | 30 | 41 | 51 | 60 | 70 | 78 | 87 |
| Messspur Nr.3 [mm] | 20 | 30 | 41 | 51 | 60 | 70 | 79 | 88 |
| Messspur Nr.4 [mm] | 20 | 30 | 41 | 51 | 60 | 70 | 78 | 87 |
| Messspur Nr.5 [mm] | 20 | 30 | 41 | 51 | 60 | 70 | 79 | 88 |
| Mittelwert | 20,0 | 30,0 | 41,0 | 51,0 | 60,0 | 70,0 | 78,4 | 87,4 |
| absolute Abweichung | 0,0 | 0,0 | 1,0 | 1,0 | 0,0 | 0,0 | -1,6 | -2,6 |
| Standardabweichung | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,0 | 0,5 | 0,5 |

Mit dem Profoscope belaufen sich die Abweichungen auf + 1 mm bei Betondeckungen bis zu 70 mm – gemäß den zulässigen Abweichungen nach DBV-Merkblatt (Abbildung 34). Somit zeigt sich das Profoscope als geeigneteres Gerät für das Referenzverfahren und wird im Weiteren für den Vergleich mit den Radarergebnissen am HTW-TK1 verwendet.

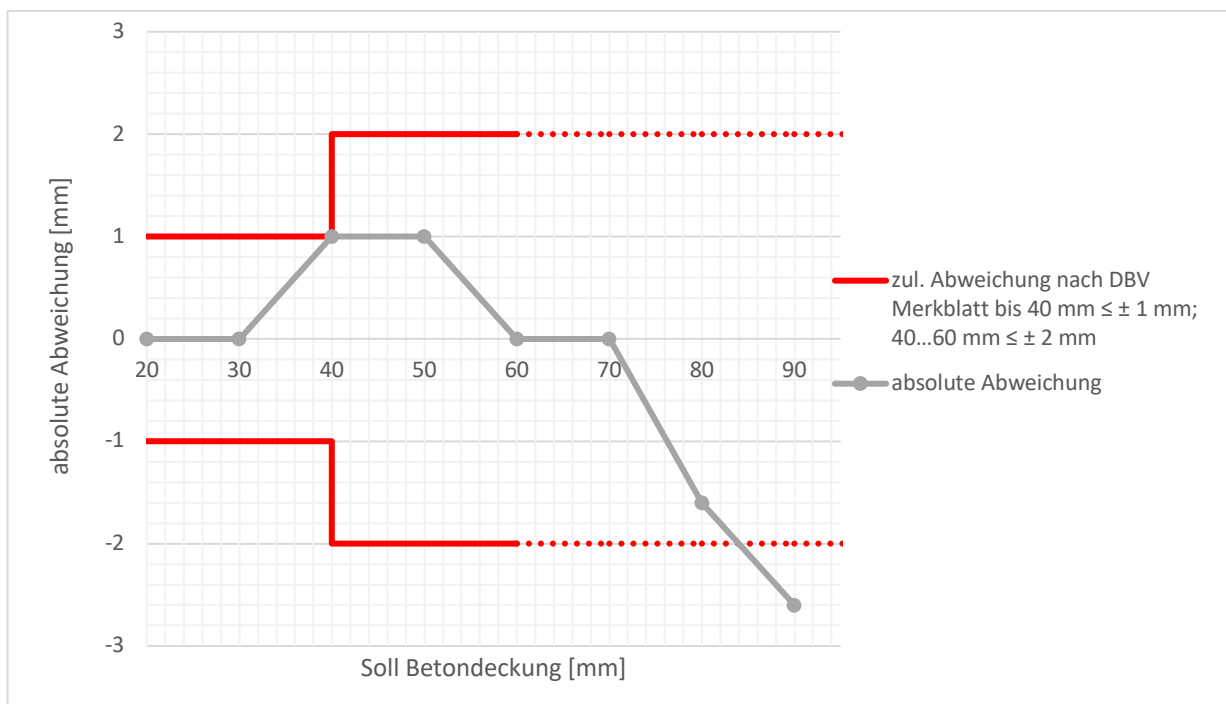


Abbildung 34: absolute Abweichung von der Soll Betondeckung am HTW-TK1; Profoscope

3.3.3 Auswertung der Radarergebnisse

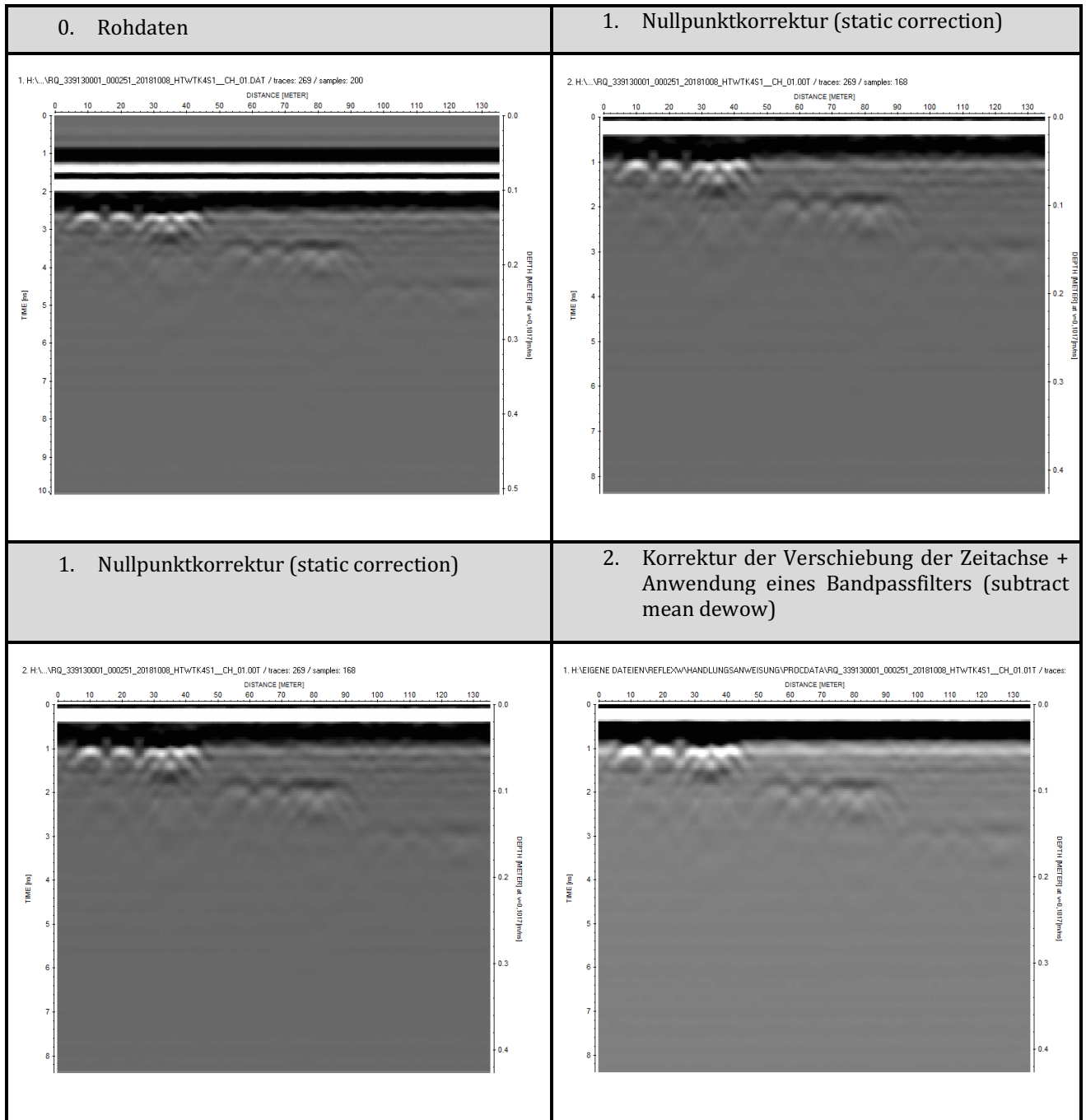
Zur Auswertung der Radarmessergebnisse wird die neutrale herstellerunabhängige Software ReflexW verwendet. Mit ReflexW ist das Importieren, Darstellen, Bearbeiten und die Interpretation von Radar Daten möglich. Die exportierten seg-y Daten aus der „Hilti PROFIS Detection (2018)“ Software werden in die ReflexW Software eingelesen (siehe Kapitel 3.2.1.1). Nach dem die seg-y Daten importiert wurden, kann mit der Datenbearbeitung begonnen werden. Für die Datenbearbeitung wurden folgende Bearbeitungsmodi festgelegt:

1. Nullpunktkorrektur → static correction
2. Korrektur der Verschiebung der Zeitachse + Bandpassfilter → subtract mean dewow
3. Hintergrundrauschen eliminieren → background removal
4. Trennung der Diffraktionshyperbeln → fk-migration
5. Verstärkung → Gain
6. Radargramm in der Tiefe begrenzen → static correction: time cut

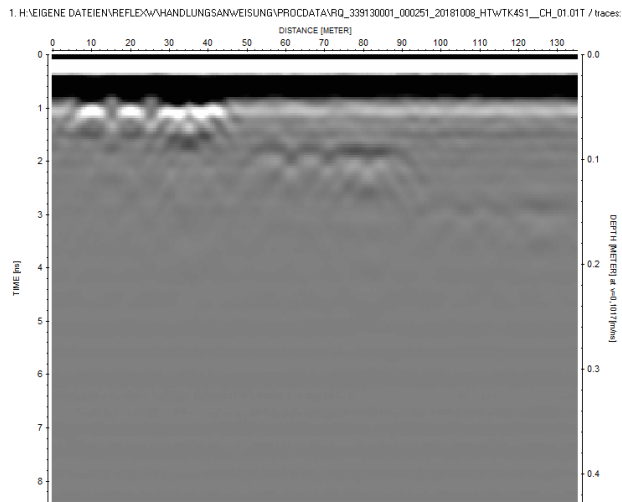
Die Datenbearbeitung wurde einmal für eine Datei für den HTW-TK1 und einmal für den HTW-TK4 durchgeführt. Anschließend können die Bearbeitungsschritte als „sequence flow“ gespeichert werden und die weitere Bearbeitung der restlichen Dateien erfolgt über „sequence processing“ zusammen für alle Dateien auf einmal.

Die Resultate der einzelnen Bearbeitungsschritte der oben aufgelisteten Reihenfolge sind in der nachfolgenden Tabelle exemplarisch dargestellt.

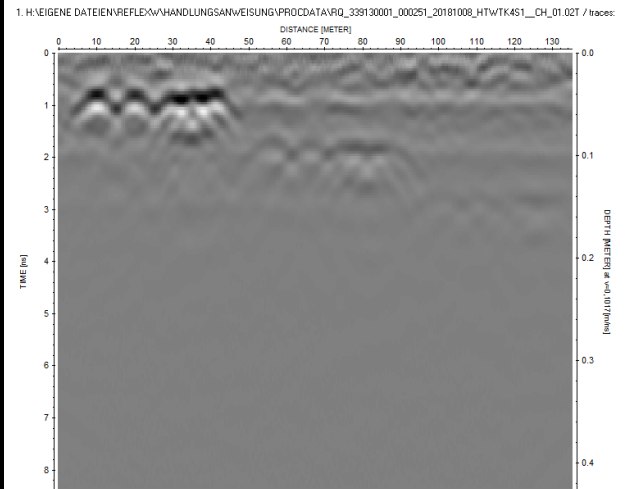
Tabelle 9: Resultate der einzelnen Bearbeitungsschritte von Reflexw



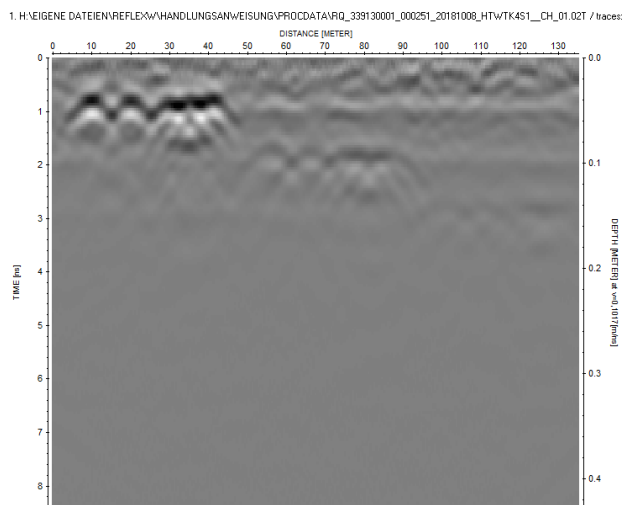
2. Korrektur der Verschiebung der Zeitachse + Anwendung eines Bandpassfilters (subtract mean dewow)



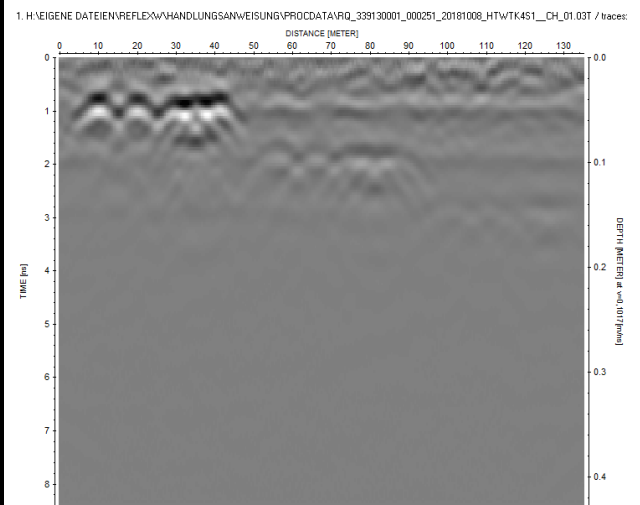
3. Eliminierung des Hintergrundrauschens (Background removal)



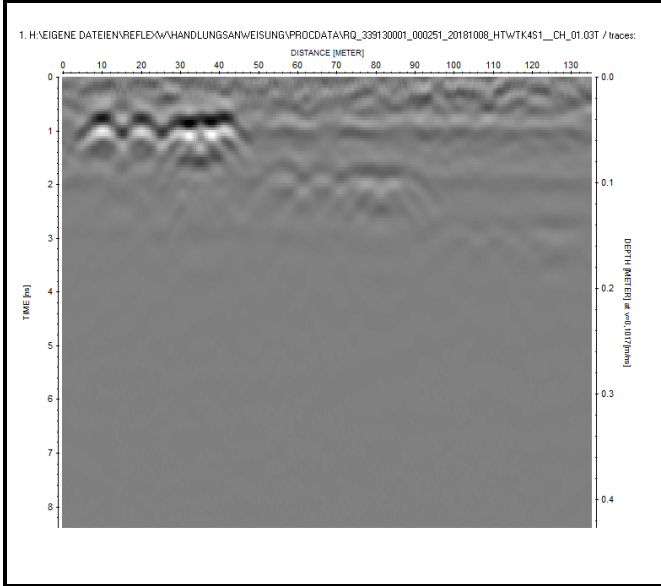
3. Eliminierung des Hintergrundrauschens (Background removal)



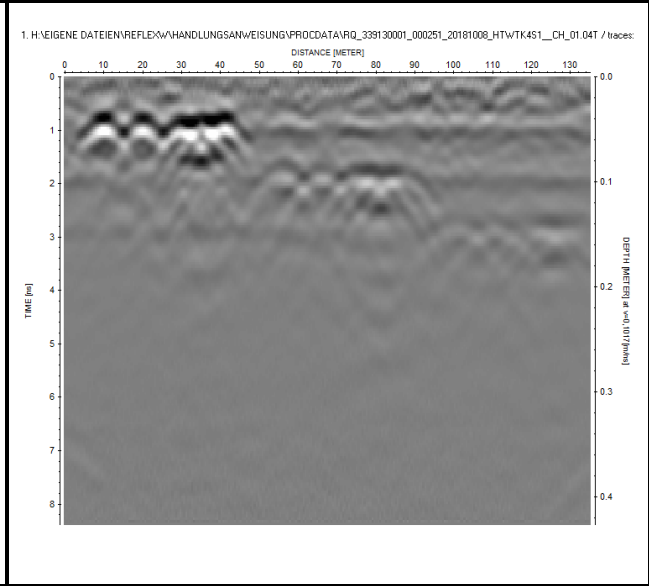
4. Trennung der Diffraktionshyperbeln (fk-migration)



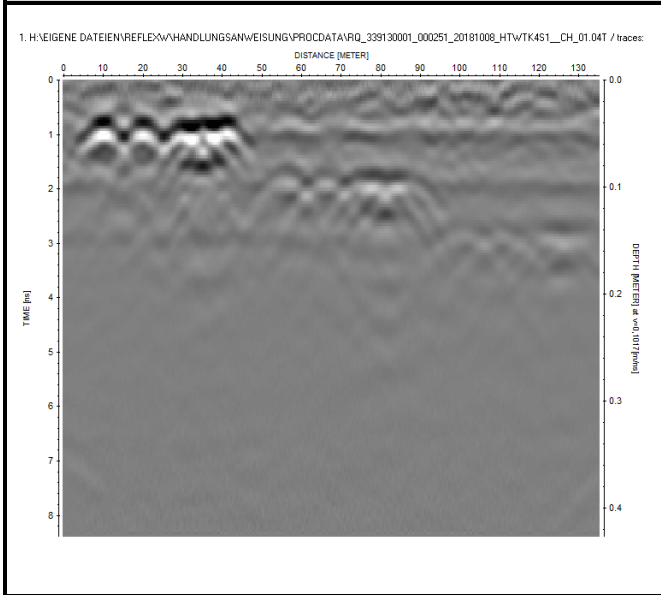
4. Trennung der Diffraktionshyperbeln (fk-migration)



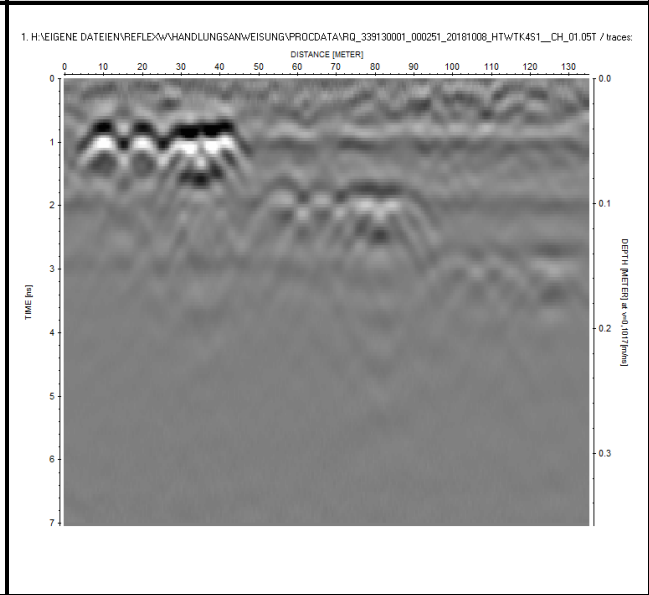
5. Verstärkung des Signals (gain function)



5. Verstärkung des Signals (gain function)

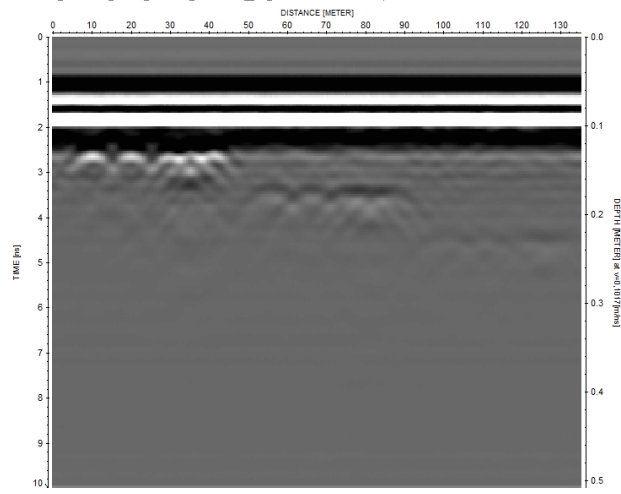


6. Begrenzung des Radargramms in der Tiefe (time cut)



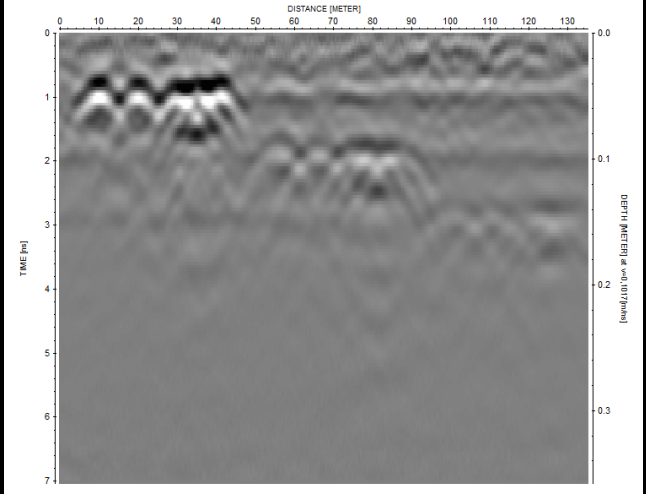
0. Rohdaten

1. H:_VRQ_339130001_000251_20181008_HTWTK451_CH_01.DAT / traces: 269 / samples: 200



6. Zustand nach vollständiger Bearbeitung

1. H:\EIGENE DATEIEN\REFLE\W\HANDLUNGSANWEISUNG\PROCDATA\VRQ_339130001_000251_20181008_HTWTK451_CH_01.05T / traces:



3.3.3.1 Nullpunktkorrektur

Bei allen Messdaten muss zunächst der Nullpunkt der Zeitachse eingestellt werden, bei dem die ausgesandte elektromagnetische Welle auf die Oberfläche des Prüfobjekts eintrifft. Die systembedingten Laufzeiten durch das Prüfgerät beim Senden und Empfangen sowie die Laufzeit im Luftspalt müssen dafür abgezogen werden; dieser Vorgang wird als Nullpunktkorrektur bezeichnet. Da das **Ersteinsatzsignal den Phasenwechsel weiß-schwarz-weiß** hat, wurde **das Maximum der schwarzen Phase als Nullpunkt** mit dem Wigglewindow gesetzt. Dementsprechend wurde die Laufzeit bis zu diesem gesetzten Nullpunkt (=Nullpunktkorrektur) in den Bearbeitungsmodus „static correction“ übernommen (siehe Kapitel 3.3.3).

3.3.3.2 Kalibrierung der Ausbreitungsgeschwindigkeiten

Nach der abgeschlossenen Bearbeitung der Daten (Kapitel 3.3.3) erfolgt die **Kalibrierung der Ausbreitungsgeschwindigkeit an dem tiefsten zu detektierendem Objekt im Testkörper**. Die nachfolgenden Ergebnisse gelten alle auf der Basis dieser Festlegung. Die Festlegung der Kalibrierung an dem tiefsten zu detektierenden Objekt entspricht der praktischen Vorgehensweise für den Fall der Detektion der Rückwand oder eines tiefliegenden metallischen Hüllrohrs und wurde deshalb so festgelegt.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit wird über die Messgröße der Laufzeit und der Tiefe des Referenzobjekts gepickt. **Für die Laufzeit wird das Erstmaximum der Reflexion an der Messoberfläche (Phasenfarbe: schwarz) bis zum Reflexionsmaximum des Objektes (Phasenfarbe: schwarz – beim Übergang Beton/Luft; weiß beim Übergang Beton/Stahl) gepickt**. Für HTW-TK1 ist das Referenzobjekt die **Rückwand** und für HTW-TK4 ist dies der **Bewehrungsstab Nr. 6** bei einer Betondeckung von 100 mm, da die Rückwand bei 35,9 cm sich nicht mehr detektieren lässt. Zur Veranschaulichung dient die Abbildung 35 in dem der Testkörper HTW-TK1 mit den Messdaten vom 15.06.2018 dargestellt und das Wigglewindow für die Pickung eingeblendet ist. Durch Iteration mit dem festen Parameter der Bauteildicke von 0,197 m und einer Laufzeit von 3,8933 ns, ergibt sich eine Ausbreitungsgeschwindigkeit von 0,1012 m/ns ($d = \frac{v \cdot t}{2}$). Dementsprechend wurden die Ausbreitungsgeschwindigkeiten für alle Messungen kalibriert.

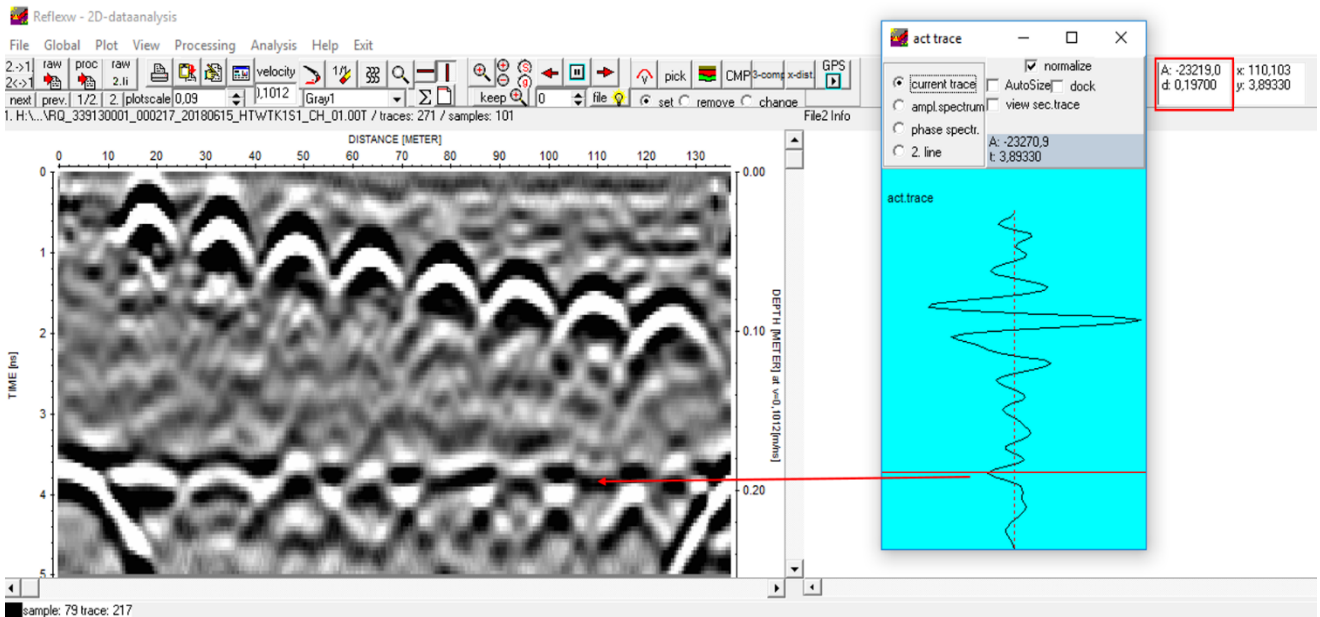


Abbildung 35: Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit – bspw. für HTW TK-1 vom 15.06.2018 dargestellt

Da ein direkter Zusammenhang zwischen der Ausbreitungsgeschwindigkeit v und der Permittivität ϵ besteht, kann anschließend von der Ausbreitungsgeschwindigkeit v auf die Permittivität ϵ geschlossen werden ($\epsilon = \frac{c^2}{v^2}$). Die Permittivität wird verwendet, um deren Entwicklung mit dem Betonalter in Kapitel 3.3.1 in Zusammenhang zu stellen.

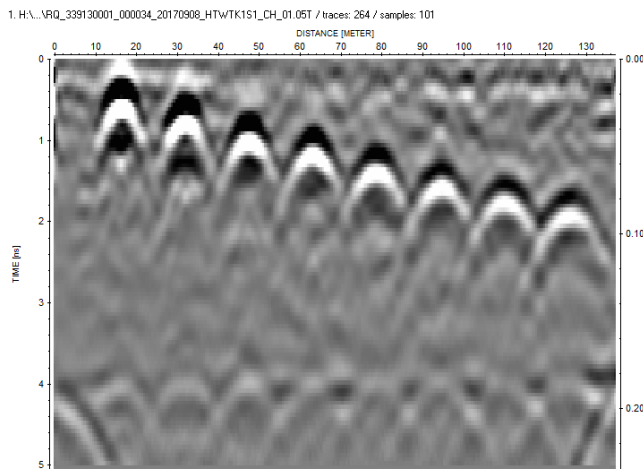
3.3.3.3 Pickung der Laufzeiten als Messgröße für die Betondeckung

Die Pickung der Betondeckung erfolgt manuell mit dem Pickungsmodul von ReflexW. Eine automatisierte Pickung ist auch möglich, jedoch bei der Anzahl von gepickten Daten im Verhältnis zum Aufwand des Nachprüfens nicht sinnvoll. Die gepickten Laufzeiten und angegeben Tiefen (Betondeckung) werden in Excel übertragen und dort tabellarisch und graphisch im Verhältnis zu der Soll Betondeckung ausgewertet. Die Ermittlung der Detektierbarkeit der Bewehrungsstäbe ist zu einem gewissen Grad von der visuellen Einschätzung abhängig. Denn ob die Diffraktionshyperbel auf einen Bewehrungsstab hinweist oder nicht, ist im Endeffekt nur durch den der die Daten analysiert zu bewerten.

3.3.3.4 Ergebnisse

Die Radargramme vom Hilti PS 1000 in Abbildung 36 und Abbildung 37 zeigen jeweils auf der linken Seite den jeweiligen Testkörper kurz nach der Betonage und auf der rechten Seite nach der letzten aufgenommenen Messung. Es wird deutlich, dass je mehr der Testkörper an Betonfeuchte verliert, desto deutlicher die Reflexionen der Bewehrungsstäbe werden.

**HTW-TK1 - Hilti PS 1000 - 12 Tage nach Betonage –
 $\varepsilon = 10,4$**



**HTW-TK1 - Hilti PS 1000 – 450 Tage nach Betonage
– $\varepsilon = 10,4$**

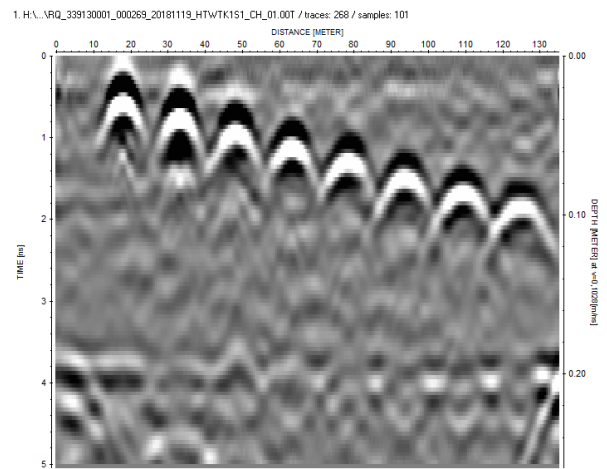
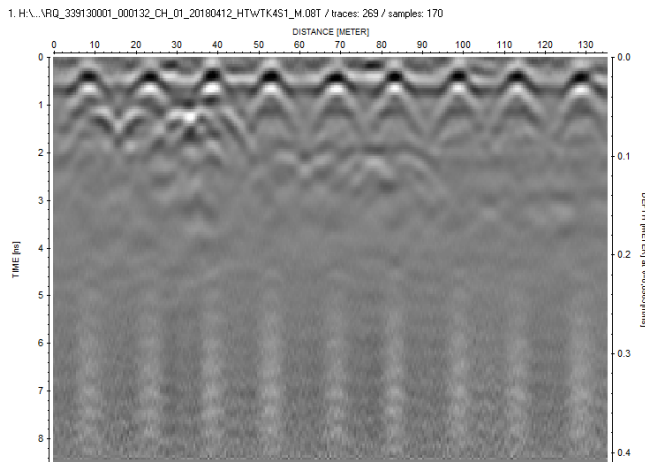
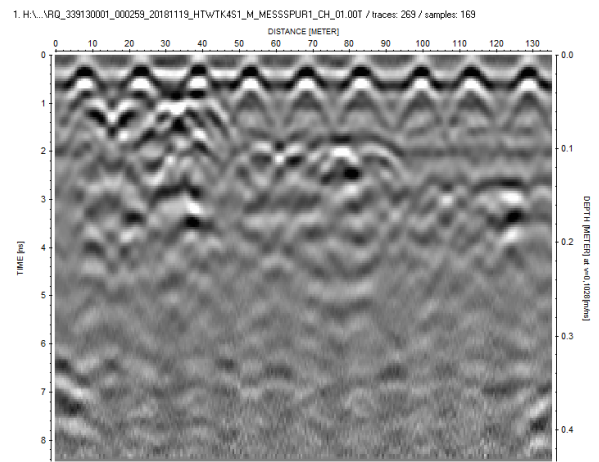


Abbildung 36: Radargramme von dem links jungen HTW-TK1 und rechts ausgehärtetem HTW-TK1

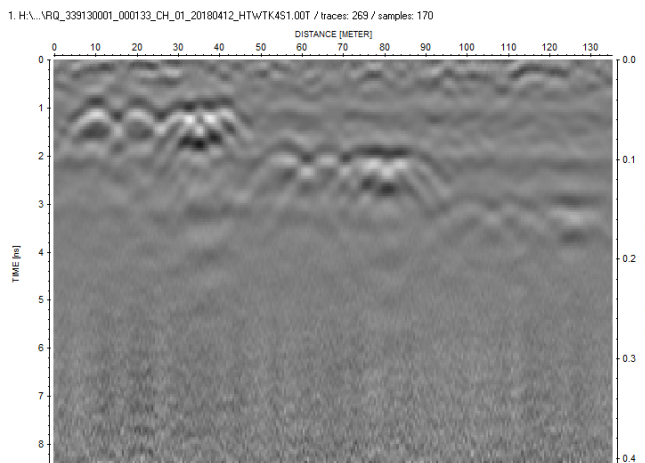
**HTW-TK4 - Hilti PS 1000 - mit oberflächennah
bewehrten Bereich - 3 Tage nach Betonage - $\varepsilon = 9,7$**



**HTW-TK4 - Hilti PS 1000 - mit oberflächennah
bewehrten Bereich - 224 Tage nach Betonage -
 $\varepsilon = 8,1$**



**HTW-TK4 - Hilti PS 1000 - mit oberflächennah
unbewehrten Bereich - 3 Tage nach Betonage - $\varepsilon = 9,7$**



**HTW-TK4 - Hilti PS 1000 - mit oberflächennah
unbewehrten Bereich - 224 Tage nach Betonage -
 $\varepsilon = 8,1$**

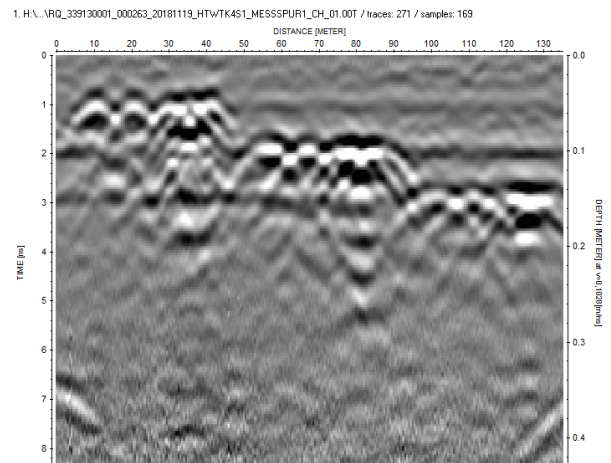


Abbildung 37: Radargramme von dem links jungen HTW-TK4 und rechts ausgehärtetem HTW-TK4

Im Folgenden werden die Messergebnisse für den HTW-TK1 und HTW-TK4 getrennt ausgewertet. Im Allgemeinen wird die Betondeckung immer zu groß (Abweichungen immer positiv) an beiden Testkörpern detektiert.

HTW-TK1

Die Ergebnisdarstellung in Abbildung 38 stellt alle gemessenen Betondeckungen (20 bis 90 mm, Genauigkeit der Einbautiefe $\pm 0,5$ mm) über der Zeit (bis 450 Tage mit immer länger werdenden Ablesezyklen mit zunehmendem Betonalter) dar. Auf der Primärachse befinden sich die Betondeckungen von 20 bis 90 mm und auf der Sekundärachse die Permittivität. Die gemessenen Betondeckungen bei 20 mm sind um + 10 mm auf der y-Achse gegenüber der Ist-Betondeckung von 20 mm verschoben, so dass es leicht zu einer Verwechslung kommt und die gemessene Betondeckung von 20 mm irrtümlich mit der Ist-Betondeckung von 30 mm verglichen werden kann. Es ist deutlich zu erkennen, dass je länger der Betonkörper ausgetrocknet ist, umso genauer nähert sich die gemessene Betondeckung der Ist-Betondeckung an. Die Abweichung bei den geringeren Tiefen mit zunehmendem Betonalter können u.U. dadurch erklärt werden, dass die Kalibrierung an der Rückwand ($d = 19,7$ cm) nicht repräsentativ für den Beton nahe der Oberfläche ist.

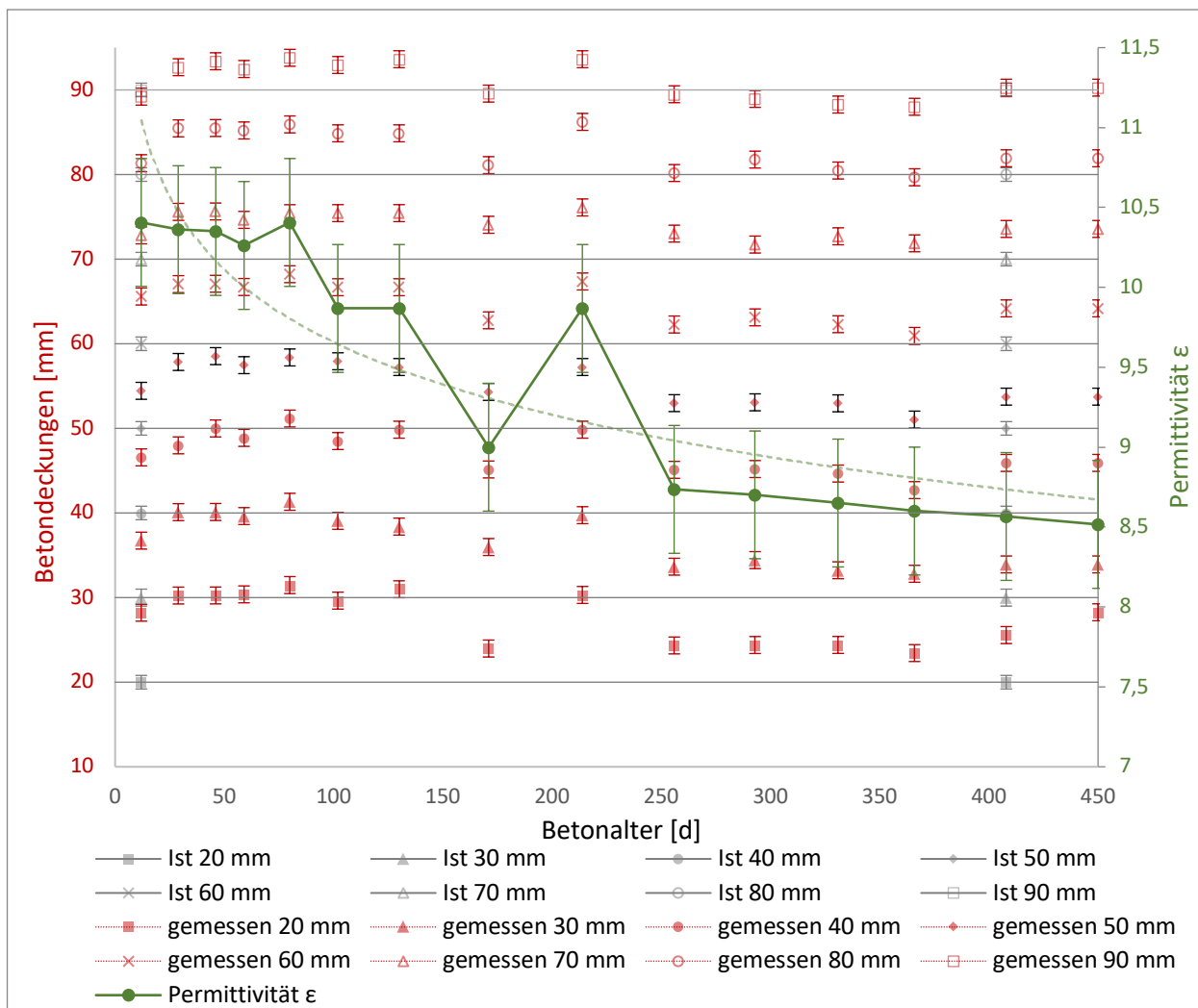


Abbildung 38: Ergebnisdarstellung HTW-TK1

Weitere Ergebnisse: basierend auf der Tabelle der Messdaten in Anlage 4

- Für 40...90 mm Betondeckung ab 3 Tagen nach Betonage mit Abweichungen von bis zu + 5 mm; decken die Erkenntnisse in [27], wo ebenfalls die Genauigkeit der Betondeckungsmessung mit dem Radargerät Hilti PS-1000 untersucht wurde
- 20...30 mm Betondeckung - oberflächennaher Bereich - bis 9 Monate nach der Betonage Abweichungen von bis zu + 10 mm; nach 9 Monaten Abweichungen von bis zu + 5 mm
- 20...90 mm Betondeckungen können 9 Monate nach der Betonage – vorausgesetzt der richtigen Kalibrierung – auf bis zu + 5 mm mit Radar detektiert werden

HTW-TK4

Für die Ergebnisdarstellung des Testkörpers HTW-TK4 (Abbildung 39) wurde der nicht oberflächennah bewehrte Bereich gewählt, sowie jeweils der erste Bewehrungsstab einer Reihe mit denselben fünf Betondeckungen. Auf der Primärachse sind die Betondeckungen von 50, 100, 150, 200, 250 und 300 mm aufgetragen und auf der Sekundärachse die Permittivität. Es ist ebenfalls wie beim Testkörper HTW-TK1 zu erkennen, dass je weiter vorangeschritten die Austrocknung des Betonkörpers ist, desto genauer kann die Betondeckung ermittelt werden. Die Betondeckungen in größeren Tiefen (250 und 300 mm) können in den ersten 60 Tagen nach Betonage nicht (300 mm) oder nur ungenau (250 mm) ermittelt werden.

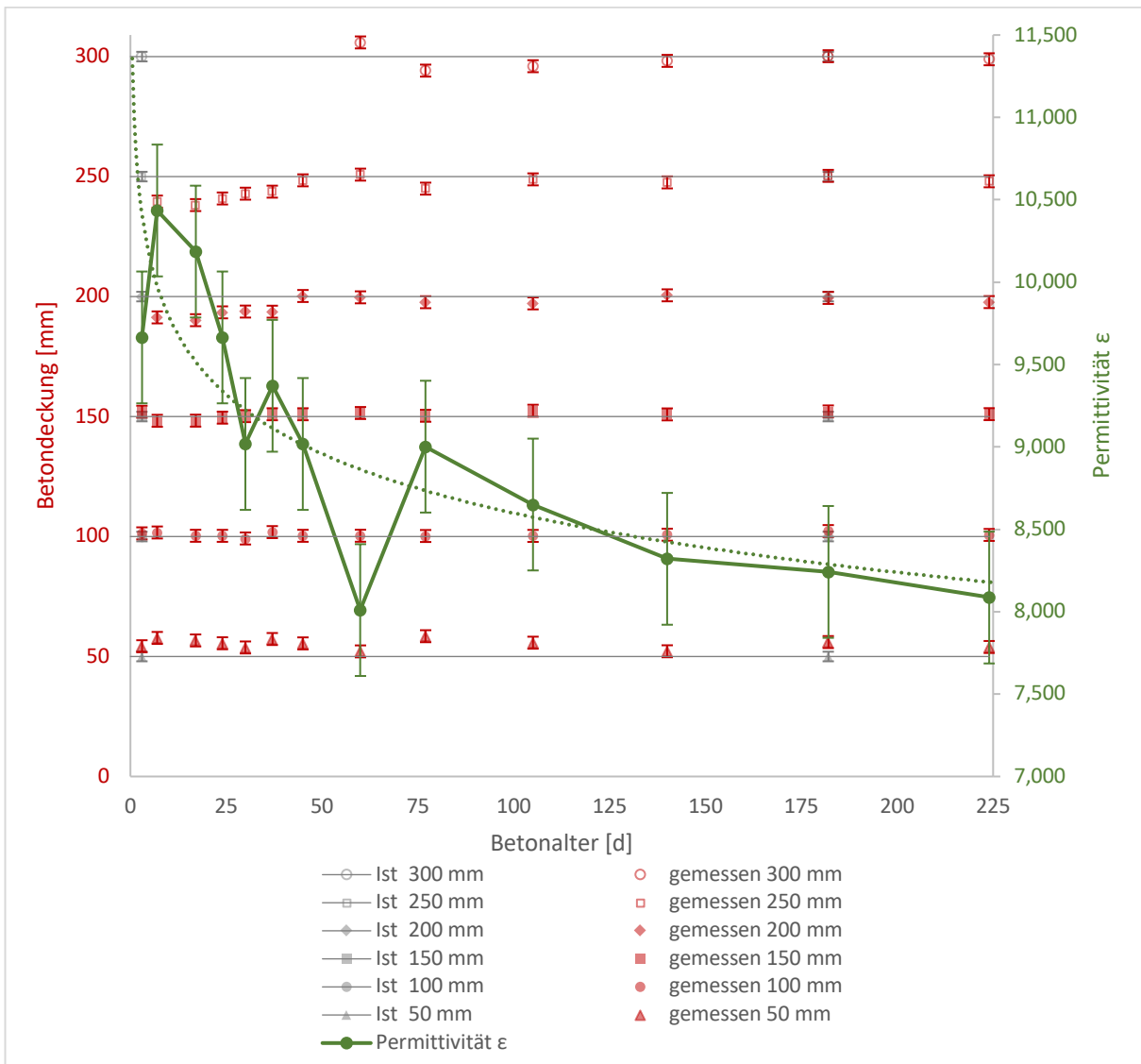


Abbildung 39: Ergebnisdarstellung HTW-TK4

Weitere Ergebnisse: basierend auf der Tabelle der Messdaten in Anlage 5

HTW-TK4, Seite 1

Im Hinblick auf das Verhältnis von der Betondeckung d_c zum Stababstand s_a (d_c/s_a) (Kapitel 3.1) konnte auf der **Seite 1** der Testkörper mit den Betondeckungen **50, 100 und 150 mm** und **ohne** oberflächennaher Bewehrung alle Verhältnisse von $d_c/s_a = 0,5 - 3$ alle Bewehrungsstäbe getrennt detektiert werden. Im Bereich **mit** oberflächennaher Bewehrung konnten die Bewehrungsstäbe in **150 mm** Tiefe nicht mehr detektiert werden. Dies hängt mit der Schwächung des Signals durch die eingebaute Bewehrungsmatte im oberflächennahen Bereich zusammen. Im Hinblick auf die Messgenauigkeit ergaben sich bei einer Betondeckung von **50 mm** bis zu **+ 5 mm** Abweichungen, welches vermutlich der Laufzeitverlängerung im oberflächennahen Bereich geschuldet ist. Bei der Betondeckung

von 100 und 150 mm ergaben sich keine nennenswerten Abweichungen. Die vereinzelt Ausreißer von + 1 mm sind vernachlässigbar. Dies hängt damit zusammen, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit an den Bewehrungsstäben mit 100 mm Betondeckung kalibriert wurde.

HTW-TK4, Seite 2

Auf der **Seite 2** des Testkörpers mit den Betondeckungen **200, 250 und 300 mm ohne** oberflächennahe Bewehrung wird eine Woche nach der Betonage jeweils nur der **erste** Bewehrungsstab mit einer Betondeckung von **200 und 250 mm** und einem Stababstand von **50 mm** detektiert. Nach **zwei** Monaten wird auch der **erste** Bewehrungsstab mit **300 mm** Betondeckung und einem Stababstand von **50 mm** detektiert. **77 Tage** nach der Betonage lassen sich im Bereich der Betondeckungen von **150 mm** zum ersten Bewehrungsstab auch der dritte und fünfte Bewehrungsstab detektieren. Die roten Referenzstäbe werden jeweils nicht detektiert (Abbildung 40), daher lassen sich auch keine Verhältnis von der Betondeckung d_c zum Stababstand s_a (d_c/s_a) ermitteln.

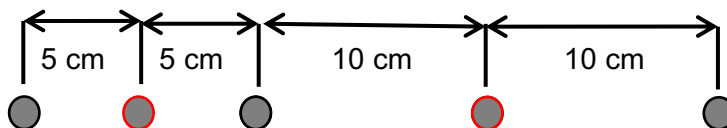


Abbildung 40: Systematik der Anordnung der Stäbe im TK HTW-TK4

Auf der oberflächennah bewehrten der Seite 2 mit den Betondeckungen **200, 250 und 300 mm** wird kein Bewehrungsstab detektiert, lediglich die Bewehrungsmatte.

Über die Vorgaben der BAST hinaus, wurden die Messungen mit einem weiteren Radargerät, dem Proceq GPR Live durchgeführt und ausgewertet. Ein Vergleich der Messergebnisse ist in Anlage 8 zu finden.

3.3.4 Messunsicherheit

Für eine objektive Bewertung der Messdaten ist die Angabe von **Messergebnis** und **Messunsicherheit** erforderlich. Die Genauigkeit einer Messung setzt sich aus der **Richtigkeit** und **Präzision** zusammen[35], welche durch die **systematischen** und **zufälligen Abweichungen** bestimmt werden. Die Genauigkeit einer Messung soll **bezeichnen**, inwieweit ein Messergebnis mit dem **wahren Wert** übereinstimmt. Die **systematischen Abweichungen** lassen sich im Idealfall korrigieren. Erst wenn sie nicht bekannt sind, haben sie einen kritischen Einfluss auf die Interpretation der Ergebnisse. Die Ergebnisse aus dem Forschungsbericht OSSCAR [17] zeigen, dass die größten Anteile der Messunsicherheit folgende Abweichungen haben:

- Abweichung der Vorlaufzeit,

-
- Abweichungen des Messgeräts (Blackbox) und
 - Streuung der Ausbreitungsgeschwindigkeit/Permittivität.

Bei der Vorlaufzeit handelt es sich um eine **systematische** Abweichung, welche bei der Bearbeitung der Rohdaten mit der ReflexW Software korrigiert wurde (vgl. Kapitel 3.3.3.1). Bei den Abweichungen des Messgeräts sowie der Permittivität handelt es sich um **zufällige** Abweichungen. Zu diesen wurden weitere für dieses Forschungsvorhaben relevante **zufällige** Abweichungen identifiziert:

Zufällige Abweichungen:

- Schwankung der tatsächlichen Betondeckung: $\pm 0,5$ mm
- Abweichung der Laufzeit
- ungleichmäßiges Austrocknungsverhalten des Betonkörpers
- Ablesevermögen des Prüfers

In der folgenden Tabelle 10 werden die einzelnen Einflussgrößen der Abweichung benannt und deren Auswirkung auf die Messunsicherheit bzw. deren Kompensation erläutert.

Tabelle 10: Auswirkungen der zufälligen Abweichungen auf die Messunsicherheit

| Einflussgröße | Auswirkung auf die Messunsicherheit |
|--|---|
| Abweichung des Messgeräts (Blackbox) | wird durch Wiederholungsmessungen quantifiziert |
| Streuung der Ausbreitungsgeschwindigkeit/ Permittivität | Ausbreitungsgeschwindigkeit/Permittivität nicht an jeder Stelle gleich; Austrocknung kann erfahrungsgemäß um $\varepsilon = \pm 0,1$ [-] für die Permittivität variieren |
| Schwankung der Betondeckung: $\pm 0,5$ mm | $\frac{2 \cdot d}{t} = v = \frac{c_0}{\sqrt{\varepsilon}} \rightarrow$ die Schwankungen der Betondeckung von $\pm 0,5$ mm ist so gering, dass sie keine signifikante Auswirkungen auf die Ausbreitungsgeschwindigkeit und somit auf die Permittivität haben. |
| Abweichungen der Laufzeit | Eine minimale Abweichung der Laufzeit bewirkt eine starke Abweichung der Permittivität, denn diese wird in der Formel quadriert ($\varepsilon = \left(\frac{c_0}{v}\right)^2$); kann Abweichungen von bis zu $\varepsilon = \pm 0,5$ [-] hervorrufen |
| Austrocknungsverhalten des Betonkörpers | Abbildung 28 zeigt, dass der größte Teil der Austrocknung sich in den ersten 45-50 Tagen passiert und somit in dieser Zeit auch die größten Schwankungen in der Permittivität sich widerspiegelt. Nachdem der größte Teil der Austrocknung abgeschlossen ist, gleicht sich die Permittivität an die logarithmische Trendlinie an (Abbildung 29 und Abbildung 30). |
| Ablesevermögen des Prüfers | Wird durch immer dieselbe mit den Messgeräten vertraute Person durchgeführt. Ebenso sind die Randbedingungen durch die Laborumgebung gut geeignet. Schwierige Randbedingungen wie Kälte, beengter Raum und Zeitdruck sind nicht gegeben. |

Für die Feststellung der Messunsicherheit können Erfahrungswerte angesetzt werden und nach der Vorgehensweise „GUM Typ B“ berücksichtigt werden. Bei der hier vorgenommenen Auswertung wurden für die Unsicherheit der Ablesung der Laufzeit und der Unsicherheit der genauen Kenntnis von v bzw. ε

die maximal zu erwartenden Abweichungen in die Modellgleichung eingesetzt. Aus dieser Modellgleichung zur Extremwertabschätzung resultierte eine feste Spannweitendifferenz von $\pm 0,4$ aus der Differenz der beiden Extremwerte, welche die zuvor aufgelisteten **zufälligen** Abweichungen kompensiert. Diese feste Spannweitendifferenz wurde auf die Diagramme in Abbildung 29 und Abbildung 30 in Kapitel 3.3.1 als Fehlerbalken angesetzt.

4 Vergleichende Beurteilung Radar vs. magnetisch induktive Verfahren (AP3)

Im Folgenden werden das **Radarverfahren** und das **magnetisch induktive Verfahren im** Hinblick auf:

- den zeitlichen Messaufwand
- die Messgeschwindigkeit
- die Datenaufnahme
- die Genauigkeit
- die Erkenntnisse für die qualitätsgesicherte Verfahrensanwendung

vergleichend beurteilt.

Messaufwand:

Der zeitliche Messaufwand ist bei beiden Verfahren annähernd gleich. Bei den magnetisch induktiven Verfahren muss der Durchmesser voreingestellt werden, beim Radarverfahren hingegen nicht. Beim Radarverfahren muss die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Radarimpulse kalibriert werden; das sollte vorzugsweise vor Ort erfolgen, was den Messaufwand vergrößert. Bei allen Geräten mit Aufzeichnung der Messlinien müssen das Projekt und die Projektdatei im Gerät abgespeichert werden. Bei reinen Handmessungen müssen die Einzelwerte der Messposition in der Ergebnisdokumentation zugeordnet werden, was sehr aufwändig sein kann.

Messgeschwindigkeit:

Die Messgeschwindigkeit ist bei beiden Verfahren ebenfalls annähernd gleich. Beim Radarverfahren und beim magnetisch induktiven Verfahren mit dem Profometer PM-630 Gerät ist die Messgeschwindigkeit geringfügig schneller als beim Profoscope, da die Geräte mit den Laufrädern über die Betonoberfläche gerollt werden. Hingegen dauert die Detektion tiefer liegender Stäbe beim magnetisch induktiven Verfahren mit dem Profoscope Gerät länger, da das Handgerät vor und zurückbewegt werden muss, bis man ein eindeutiges Signal bekommt. Daher ist hier die Messgeschwindigkeit langsamer als bei den anderen beiden Geräten.

Datenaufnahme:

Bei dem Profoscope müssen die gemessenen Betondeckungen während des Abfahrens auf der Betonoberfläche händisch notiert werden. Die gemessenen Betondeckungen können im Nachhinein nicht dem Messort zugeordnet werden, da das Gerät die Daten aber nicht den Messort abspeichert. Das Profometer PM-630 speichert die Daten entlang der Messstrecke im Gerät und die Betondeckungen

können nach Abschluss der Messungen sofort vom Gerät sowie aus der PL-Link Software am Computer ausgelesen werden.

Das Radargerät **Hilti PS-1000** speichert die Daten entlang der Messstrecke im Gerät und diese müssen anschließend in die Herstellersoftware „Hilti Profis Detection“ eingelesen werden, um dort die Radardaten zuerst zu bearbeiten (Ausbreitungsgeschwindigkeit bzw. Permittivität ermitteln) und anschließend die Betondeckung zu ermitteln. Dieser Prozess dauert bei Radar erheblich länger als bei den magnetisch induktiven Verfahren.

Genauigkeit:

Die **Genauigkeit** wird durch die **Richtigkeit** der Messergebnisse (magn. induktiv: Kenntnis des tatsächlichen Durchmessers; Radar: Kalibrierung der Ausbreitungsgeschwindigkeit) und der **Präzision** in Form der Standardabweichung angegeben.

Richtigkeit:

- magn. induktiv: Kenntnis des tatsächlichen Durchmessers muss gegeben sein
- Radar: Kalibrierung der Ausbreitungsgeschwindigkeit

Richtwerte für die Ermittlung der Permittivität ϵ (verwendeter Beton: CEM III B 42,5 L, GK16):

- „junger“ Beton: $\epsilon \approx 10,4 \leftrightarrow v \approx 0,093 \text{ m/ns}$
- „hydratisierter“ und noch nicht vollständig ausgetrockneter Beton: $\epsilon \approx 8,5 \leftrightarrow v \approx 0,1028 \text{ m/ns}$

Präzision:

- Testkörper:
 - Schwankung der Ist-Betondeckung: $\pm 0,5 \text{ mm}$
 - Heterogenität des Betons verbunden mit der Streuung der Ausbreitungsgeschwindigkeit
- magn. induktiv:
 - Profoscope auf + 1 mm genau; hält die Genauigkeitsanforderungen des DBV-Merkblatts ein
 - Profometer PM-630 auf + 3 mm genau; hält die Genauigkeitsanforderungen des DBV-Merkblatts nicht ein; decken Forschungsergebnisse aus [34]
- Radar:
 - Streuung der Ausbreitungsgeschwindigkeit/Permittivität
 - systematisch größere Abweichungen der oberflächennahen Bewehrung im Gegensatz zur tiefer liegenden Bewehrung durch

- schnelleres Austrocknen an der Betonoberfläche → höhere Ausbreitungsgeschwindigkeiten → Laufzeiten müssten somit mit einer höheren Ausbreitungsgeschwindigkeit multipliziert werden
- den Sender-Empfänger-Abstand der Radarantennen im Gerätegehäuse
- systematische Abweichungen werden mit der Tiefe kleiner (d.h. die Laufzeitverlängerung)
- Permittivität weicht offensichtlich im oberflächennahen Beton durch stärkere Austrocknung vom Kernbeton ab (messtechnisch hier nicht nachgewiesen)
- Mit Radar sind die Genauigkeitsanforderungen des DBV-Merkblatts i.d.R. nicht einzuhalten

Im Hinblick auf den Messaufwand und die Messgeschwindigkeit unterscheiden sich die beiden Verfahren nicht nennenswert. In der Auswertung ist das Radarverfahren jedoch zeitintensiver und erfordert eine Festlegung der Datenbearbeitungsschritte und der festzulegenden Parameter, bietet aber mehr Möglichkeiten, die Rohdaten zu verbessern. Der höhere Zeitaufwand hängt bei der hier gewählten, herstellerneutralen Darstellung damit zusammen, dass die Radardaten erst in eine Software am PC übertragen werden müssen, dann die Ausbreitungsgeschwindigkeit bzw. Permittivität ermittelt werden muss und erst anschließend die Betondeckung ermittelt werden kann. Alternativ kann im Gerät auch die Permittivität (bei dem Hilti PS-1000 als Beton-Parameter bezeichnet) eingestellt werden. Dabei wird die Permittivität solange angepasst bis die Rückwand oder ein Reflektor im Display in der bekannten Tiefe erscheinen.

Erkenntnisse für die qualitätsgesicherte Verfahrensanwendung:

Anmerkung: Die Ergebnisse gelten auf der Basis der Vorgehensweise, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit über die Rückwand bzw. den am tiefsten liegenden und noch detektierbaren Reflektor kalibriert wird.

Erkenntnisse mit dem Radargerät Hilti PS-1000:

- Abweichungen der Betondeckung immer **zu groß**; nie zu geringe Betondeckung detektiert
- **40...90 mm** Betondeckung können **3 Tage** nach Betonage mit einer Abweichung von **+ 5 mm** detektiert werden, was vermutlich der Laufzeitverlängerung bei geringen Betondeckung geschuldet ist, sowie der Austrocknung des oberflächennahen Betons und der damit schnelleren Ausbreitungsgeschwindigkeit, was wiederum Einfluss auf die Permittivität hat
- **ab 100...150 mm** Betondeckung exakte Detektion **ohne nennenswerte Abweichung** 3 Tage nach Betonage möglich, wenn die Kalibrierung der Ausbreitungsgeschwindigkeit über bekannte Betondeckung einiger Stäbe im Bereich der zu detektierenden Betondeckung erfolgt

- der **oberflächennah bewehrte** Bereich (hier: Matte Q188, 15 cm Stababstand) hat keinen Einfluss auf die Ortung und Genauigkeit der Betondeckung der **tiefer liegenden** Bewehrungsstäbe
 - tiefer liegende Bewehrungsstäbe mit einem dichten Achsabstand **von 50 mm** können hinter einem dichtbewehrten Bereich nicht eindeutig detektiert werden
 - tiefere Betondeckung als 150 mm kann erst 3 Monate nach der Betonage detektiert werden

Erkenntnisse magnetisch induktive Verfahren mit dem Profoscope:

- 20...70 mm Betondeckung exakte Detektion **ohne Abweichung** möglich
- ab 80 mm Betondeckung beträgt die Abweichung der Detektion + 2 mm

5 Anwendungshinweise (AP4)

Die folgenden Anwendungshinweise können aus den Messergebnissen und den Ergebnissen der Literaturrecherche gezogen werden:

Magnetisch induktive Verfahren:

- Zuverlässige **Messung der Betondeckung** an Bewehrungsstäben in einer Tiefe von **20 bis 70 mm** bei Einhaltung der nach DBV-Merkblatt [18] geforderten Genauigkeit von +/- 1..2 mm [23]
- Die Einhaltung der Genauigkeitsanforderungen des DBV können nur eingehalten werden, wenn auch der Durchmesser *genau* bekannt ist und (bei den meisten Geräten) eingegeben wird. (In Sonderfällen verfügen Geräte u.U. über eine automatisierte Ermittlung des Stabdurchmessers.)
- Generell wird empfohlen, je Bauwerk die angezeigte Betondeckung an freiliegenden oder ggf. freizulegenden Bewehrungsstäben repräsentativ zu überprüfen, um systematische Abweichungen, z. B. durch eisenhaltige Gesteinskörnung oder geschweißte Matten, zu erkennen. In solchen Fällen sollte das magnetisch induktive Verfahren auf die Referenzstelle kalibriert werden. Dies kann je nach Gerät, z. B. durch Einstellen eines „Offset-Wertes“, vorgenommen werden.
- Die **Grundvoraussetzung** zur Durchführung einer Betondeckungsmessung bei benachbarten Bewehrungsstäben ist deren **getrennte Erkennbarkeit**. Die nachfolgenden Kriterien wurden [[23]]:
 - Benachbarte Stäbe können sicher voneinander getrennt werden, wenn das Verhältnis Achsabstand (s_a) zu Betondeckung (d_c) größer 2 ist.
 - Liegt das Verhältnis Achsabstand zu Betondeckung zwischen 1 und 2, hängt die Erkennbarkeit vom Stabdurchmesser ab. Dicht benachbarte Stäbe mit größerem Durchmesser können im Vergleich zu kleineren Durchmessern bei gleicher Betondeckung und gleichem Achsabstand schlechter voneinander getrennt erkannt werden.
 - Ist eine getrennte Erkennbarkeit von benachbarten Stäben mit dem magnetisch induktiven Verfahren nicht möglich, dann kann die laterale Lage der benachbarten Stäbe mit einem radarbasierten Gerät, i.d.R. mit einem Multidetektor, geortet werden. Liegt die laterale Lage der Stäbe fest, kann mit Geräten auf der Basis des magnetisch induktiven Verfahrens an diesen Stellen die Betondeckung gemessen werden, jedoch nur wenn im Gerät eine Nachbarstabskorrektur möglich ist.
 - Die Funktion einer Nachbarstabskorrektur soll bei Achsabständen der Bewehrung zwischen 50 und 90 mm erfolgen.
 - Ist der Achsabstand von zwei Stäben geringer als 30 mm, so ist der Vergleichsdurchmesser einzugeben.

- Stababstände mit Achsmaßen zwischen 30 und 50 mm sind aufgrund der dadurch eingeschränkten Betonierbarkeit der Bauteile nicht zu erwarten.

Eine mögliche Strategie mit Potenzial einer Handlungsanweisung wird in [23] gemäß der nachfolgenden Abbildung angegeben.

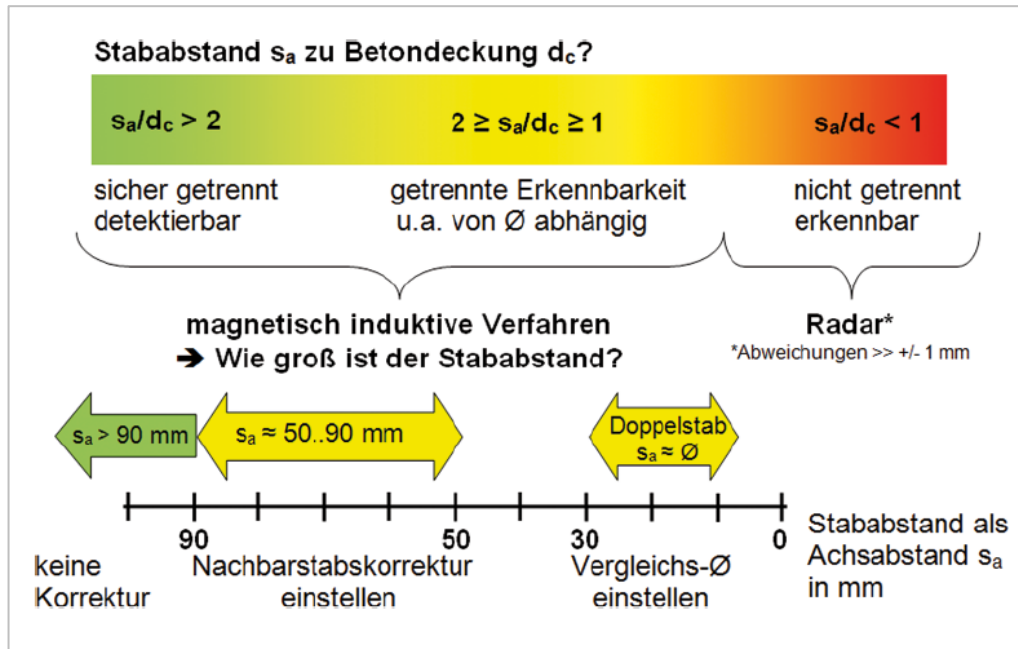


Abbildung 41: Messstrategie einer genauen Betondeckungsmessung [23]

Radar:

- Radar eignet sich für eine Detektion tieferliegender Bewehrungsstäbe, wenn die o.g. Anwendungsgrenze magnetisch induktiver Verfahren überschritten ist.
- Gemäß den im Vorhaben gewonnenen Ergebnissen ist die Angabe der Betondeckung von Bewehrungsstäben tiefer als 100 mm **ohne nennenswerte** Abweichungen mit ca. 1-2 mm möglich.

Anmerkung: Allerdings gilt dies nur bei geeigneter Kalibrierung am Bauteil. Im Vorhaben wurde die Kalibrierung an der Rückwand bei bekannter Dicke (HTW-TK1) oder beim am tiefsten sichtbaren Bewehrungsstab bei bekannter Überdeckung gewonnen (HTW-TK4). Damit stellen die gewonnenen Genauigkeiten das bestmögliche Leistungsvermögen des Verfahrens („intrinsic capability“) dar.

- Generell wird bei Radar eine Festlegung zur Kalibrierung an einem vorab festgelegten Referenzpunkt empfohlen.
- dichtbewehrter Bereich (Bewehrungsstäbe liegen hinter einer einlagigen Mattenbewehrung Q188) und getrennte Detektion von dicht benachbarten Stäben ($s_a = 5$ cm)
 - Magnetisch induktiv: $d_c/s_a > 1$ [23]

- Radar: $d_c/s_a > 3$; bis in 150 mm Tiefe
- Bewehrungsstäbe mit Betondeckungen bis zu 150 mm können 3 Tage nach der Betonage ermittelt werden (Abbildung 37); tiefere Betondeckung als 150 mm kann erst 3 Monate nach der Betonage detektiert werden
- Folgende Genauigkeiten sind erzielbar:
 - 40...90 mm **mit** einer Abweichung von **+ 5 mm**
→ decken die Forschungsergebnisse aus [17] bei dem die Abweichungen im oberflächennahen Bereich sich bei einem Vertrauensniveau von 95 % absolut auf ± 5 mm bei Betondeckungen von rd. 5 cm belaufen (vgl. Kapitel 2.4)
 - 100...150 mm **ohne** nennenswerte Abweichung;
→ bestätigt, dass die Abweichung für größere Betondeckungen vernachlässigbar klein sind $\leq 1...2$ mm (vgl. Kapitel 2.5)
- Radar eignet sich auf Grund der ermittelten Genauigkeiten im oberflächennahen Bereich von absolut + 5 mm (bei einer Kalibrierung in 10 cm Tiefe) für Bauen im Bestand als Ergänzung zu magnetisch induktiven Verfahren, da der tatsächliche Bewehrungsstabdurchmesser oft nicht bekannt ist und es in diesem Fall zu Abweichungen von bis zu ± 8 mm kommt (vgl. Kapitel 2.5)

Die bereits erfolgreiche Detektion der Bewehrungsstäbe 3 Tage nach der Betonage zeigt, dass das Radarverfahren auch im Rahmen der Qualitätssicherung im Neubau an „jungem“ Beton einsetzbar ist. Jedoch sollte bei Betondeckungen bis 70 mm und ohne oberflächennah bewehrten Bereich nach wie vor das **magnetisch induktive Verfahren** aufgrund der höheren Messgenauigkeit verwendet werden. Ab Betondeckungen von 100 mm kann das **Radarverfahren** ohne nennenswerte Abweichungen eingesetzt werden. Da die magnetisch induktiven Verfahren nur die erste Bewehrungslage detektieren können, kann das Radarverfahren zur Detektion darunterliegenden Bewehrungsstäbe (2. Bewehrungslage) verwendet werden. Ebenso kann das Radarverfahren an Neubauteilen dicht benachbarte Bewehrungsstäbe ($s_a = 5$ cm) bis in eine Tiefe von 150 mm und in zweiter Bewehrungslage bis in eine Tiefe von 100 mm detektieren. Auch kann die Betondeckungsmessung mittels Ultraschall ab einer Tiefe von 50 mm bis zu 180 mm durchgeführt werden [36]. Somit bietet auch das **Ultraschallverfahren** eine Alternative für die Sicht in tiefere Schichten, wo magnetisch induktive Geräte ihre Grenzen erreichen. Für die Betondeckungsmessung kann je nach gewähltem Ultraschallgerät eine Messgenauigkeit von $\pm 1...3$ cm erreicht werden. Auch ist eine Sicht hinter dicht bewehrte Bereiche für Ultraschall physikalisch möglich, was mit magnetisch induktiven Verfahren nicht möglich ist, wie oben bereits erwähnt. Ebenso ist die getrennte Detektion eng benachbarter Bewehrungsstäbe mit einem Verhältnis von $d_c/s_a > 1,2$ möglich. In der Abbildung 42 sind die verschiedenen Verfahren zur Betondeckungsmessung mit ihren jeweiligen Möglichkeiten und Grenzen zusammengefasst.

Im Hinblick auf das Nichteinhalten der Genauigkeitsanforderungen des DBV-Merkblattes ist zum einen das vorhandene DBV-Merkblatt explizit für den Hochbau (Kapitel 2.5) - derzeit gibt es kein Merkblatt für das Anwendungsgebiet der Brücken und Tunnel - zu erwähnen und zum anderen kann dieser Umstand zu Diskussionen in den Normengremien führen, so dass es zu einer Anpassung der Größe des Vorhaltemaße führen könnte.

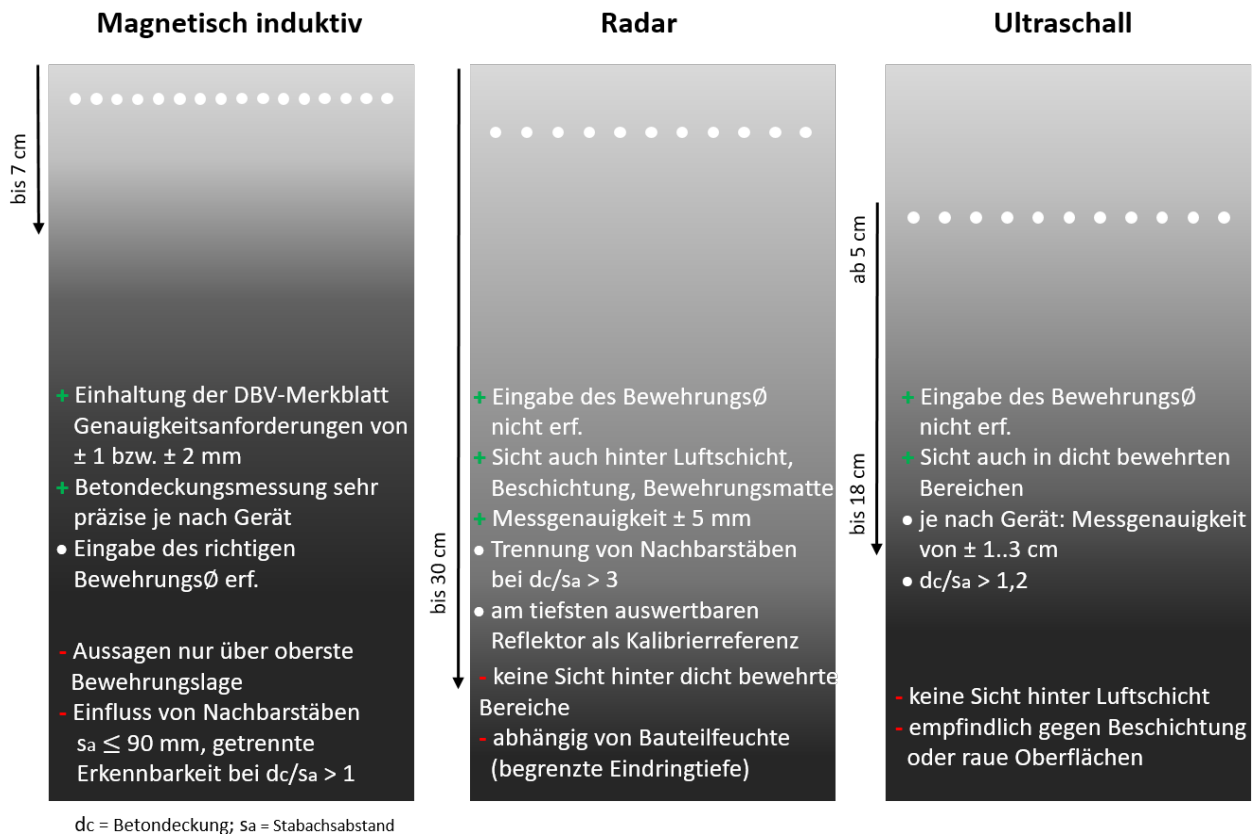


Abbildung 42: Vergleich der Möglichkeiten und Grenzen der einzelnen Verfahren zur Betondeckungsmessung

6 Literaturverzeichnis

- [1] J. Krieger, M. Krause und H. Wiggenhauser, *Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethode für Betonbrücken*. Reihe Brücken- und Ingenieurbau. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW Verlag für Neue Wissenschaft, 1998.
- [2] M. Krause, H. Wiggenhauser und J. Krieger, *Materialtechnische Untersuchung beim Abbruch der Talbrücke Haiger: Durchführung von Ultraschall- und Impakt-Echo-Messungen*. Reihe Brücken- und Ingenieurbau. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW Verlag für Neue Wissenschaft, 2002.
- [3] R. Holst, *Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung für Brückenbauwerke*. Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW Verlag für Neue Wissenschaft, 2006.
- [4] N. Diersch, A. Taffe, J. Wöstmann, J. H. Kurz und R. M. Moryson, *Zerstörungsfreie Detailuntersuchungen von vorgespannten Brückenplatten unter Verkehr bei der objektbezogenen Schadensanalyse*. Bremen: Wirtschaftsverlag NW Verlag für Neue Wissenschaft, 2015.
- [5] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., *Merkblatt über das Radarverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen*. Merkblatt B 10, 2008. Aufl. Berlin: DGZfP, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V, 2008.
- [6] T. Kind und C. Maierhofer, „Das Impulsradarverfahren - ein Verfahren zur zerstörungsfreien Strukturaufklärung“ in *Bauphysik-Kalender 2004*, E. Cziesielski, Hg., Berlin: Ernst & Sohn, 2004, S. 333–341.
- [7] *DBV-Merkblatt: Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen*. Berlin: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (DBV), 2014.
- [8] A. Taffe, S. Feistkorn und N. Diersch, „Erzielbare Detektionstiefen metallischer Reflektoren mit dem Impulsradarverfahren an Beton“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Jg. 107, Nr. 7, S. 442–450, 2012.
- [9] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., *Merkblatt zur zerstörungsfreien Betondeckungsmessung und Bewehrungsortung an Stahl- und Spannbetonbauteilen*, 2014. Aufl. Berlin: DGZfP, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V, 2014.
- [10] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsausschuss "Konstruktion von Betonstraßen", „Prüfung der Lagebestimmung von Dübeln und Ankern in Fahrbahndecken aus Beton“, Köln, FGSV-Arbeitspapier, 2006.
- [11] G. Patitz, „Altes Mauerwerk zerstörungsarm mit Radar und Ultraschall erkunden und bewerten“ in *Bauphysik-Kalender 2012*, N. A. Fouad, Hg., Weinheim, Germany: Ernst & Sohn, 2012, S. 203–245.
- [12] M. Mertens, Hg., *Handbuch Bauwerksprüfung: Zustandsprüfung im Bestand: Standsicherheit, Verkehrssicherheit, Dauerhaftigkeit*. Köln: Rudolf Müller, 2015.

-
- [13] S. Feistkorn, *Gütebewertung qualitativer Prüfaufgaben in der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen am Beispiel des Impulsradarverfahrens*. Zugl.: Berlin, Techn. Univ. Berlin, Diss., 2011, 1. Aufl. Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2012.
- [14] T. Kind, S. Feistkorn, C. Trela und J. Wöstmann, „Impulsradar für schadensfreie Kernbohrungen an Spannbetonbrücken“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Jg. 104, Nr. 12, S. 876–881, 2009.
- [15] T. Kind und J. Wöstmann, „Kombinierte Radar- und Ultraschalluntersuchungen zum schadfreien Kernbohren im Zuge einer Verstärkung“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Jg. 107, Nr. 4, S. 255–261, 2012.
- [16] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., *Merkblatt über Ultraschallverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen*. Berlin: DGZfP, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V, in Fertigstellung.
- [17] D. Streicher, C. Boller und A. Taffe, „Quantitative Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Radar an Stahl- und Spannbetonbauteilen“. Vortrag Mo.3.B.1. Erfurt: DGZfP, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V, Mai. 10 2010.
- [18] *DBV-Merkblatt: Betondeckung und Bewehrung: Sicherung der Betondeckung beim Entwerfen, Herstellen und Einbauen der Bewehrung sowie des Betons nach Eurocode 2*. Berlin: Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V. (DBV), 2015.
- [19] British Standards Institution, Hg., „Testing Concrete: Part 204. Recommendations on the use of electromagnetic covermeters“, 1998.
- [20] A. Schaab, C. Flohrer und B. Hillemeier, „Die zerstörungsfreie Prüfung der Betondeckung der Bewehrung (Teil 1)“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Jg. 84, Nr. 11, S. 275–279, 1989.
- [21] A. Schaab, C. Flohrer und B. Hillemeier, „Die zerstörungsfreie Prüfung der Betondeckung der Bewehrung (Teil 2)“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Jg. 84, Nr. 12, S. 324–327, 1989.
- [22] P. Gaydecki *et al.*, „Inductive and magnetic field inspection systems for rebar visualization and corrosion estimation in reinforced and pre-stressed concrete“, *Nondestructive Testing and Evaluation*, Jg. 22, Nr. 4, S. 255–298, 2007.
- [23] A. Taffe und B. Jungen, „Untersuchungen zur Genauigkeit von magnetisch induktiven Betondeckungsmessungen“, *Beton- und Stahlbetonbau*, Jg. 111, Nr. 8, S. 484–495, 2016.
- [24] J. Gams, „Erstellung eines Referenztestkörpers aus Stahlbeton für Untersuchungen mit Ultraschallecho zur bildgebenden Darstellung der inneren Konstruktion: Masterarbeit HTW Berlin“, Fachgebiet für Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen, Hochschule für Technik und Wirtschaft, Berlin, 2015.
- [25] S. Vonk, „Bildgebende Darstellung oberflächennaher Bewehrung mit Ultraschall an Beton und Ermittlung der Genauigkeit der Betondeckung: Masterarbeit HTW Berlin“, Fachgebiet für Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen, Hochschule für Technik und Wirtschaft, Berlin, 2018.

- [26] A. Taffe, M. Spies, J. Recknagel und H. Rieß, „Schulung zur zuverlässigen Ortung von Bewehrung in Stahlbetonbauteilen von Kraftwerken“. Vortrag Di.2.B.1. Bremen: DGZfP, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V, Mai. 30 2011.
- [27] O. Grudzio, „Detektion von Betonstahlbewehrung und Ermittlung der Genauigkeit der Betondeckungsmessung mit Radar bezogen auf die zeitliche Veränderung der Betonfeuchte: Masterarbeit HTW Berlin“, Fachgebiet für Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen, Hochschule für Technik und Wirtschaft, Berlin, 2018.
- [28] Proceq SA, *Profometer Operating Instructions German*.
- [29] H. Deutschland, *Hilti PS 1000 X-Scan-System*. [Online] Verfügbar unter: <https://www.hilti.de/content/hilti/E3/DE/de/engineering/design-center/detektionssysteme/detektion-systeme-auswahlhilfe/detektion-x-scan-system-ps1000.html>. Zugriff am: Jul. 09 2018.
- [30] Proceq SA. [Online] Verfügbar unter: <https://www.proceq.com/de/vergleichen/bewehrungssuche-und-betondeckungsmessung/>. Zugriff am: Jan. 23 2019.
- [31] B. Jungen, „Quantifizierung von Abweichungen bei Betondeckungsmessverfahren an dicht bewehrten Stahlbetonbauteilen mit magnetisch induktiven Verfahren“, Fachgebiet Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen, Hochschule für Technik und Wirtschaft, Berlin, 2015.
- [32] Proceq SA, *Profoscope Operating Instructions German*.
- [33] GANN Mess- und Regeltechnik GmbH, *Betriebsanleitung HYDROMETTE M4050*. Gerlingen.
- [34] Hochschule Luzern -Technik, Architektur Prof, Albin Kenel und Frank Jacobs, „Mesure et evaluation de l'enrobage de l'armature / Measurement and evaluation of the cover depths / Messung und Auswertung der Bewehrungsüberdeckung“.
- [35] Werner Hässelbarth, „BAM-Leitfaden zur Ermittlung von Messunsicherheiten bei quantitativen Prüfergebnissen: Forschungsbericht“, 2004.
- [36] S. Vonk und A. Taffe, „Detection of near-surface reinforcement in concrete components with ultrasound“, *MATEC Web Conf.*, Jg. 199, S. 6007, 2018.

7 Tabellenverzeichnis

| | |
|--|----|
| Tabelle 1: Parametervariationen der Testkörper | 33 |
| Tabelle 2: Messkonzept des magnetisch induktiven Referenzverfahrens..... | 38 |
| Tabelle 3: Messintervall HTW-TK1 über 15 Monate | 42 |
| Tabelle 4: Messintervall HTW-TK4 über 7,5 Monate | 43 |
| Tabelle 5: Messwerte zur Feuchtemessung von HTW-TK1 mit der Hydromette in Digits | 45 |
| Tabelle 6: Messwerte zur Feuchtemessung von HTW-TK4 mit der Hydromette in Digits | 46 |
| Tabelle 7: Profometer PM-630 Messungen an HTW-TK1 (Betondeckungen in mm)..... | 51 |
| Tabelle 8: Profoscope Messungen an HTW-TK1 (Betondeckungen in mm)..... | 53 |
| Tabelle 9: Resultate der einzelnen Bearbeitungsschritte von Reflexw | 55 |
| Tabelle 10: Auswirkungen der zufälligen Abweichungen auf die Messunsicherheit..... | 68 |

8 Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Vorgesehener Zeitplan zur Darstellung der Methodik des Vorgehens durch Aufgliederung | 11 |
| Abbildung 2: (a) überschnittene Bohrpfahlwand mit Lage der Messlinien; (b) Radargramm mit Lage der ausgewerteten Bewehrungsstäbe und Anordnung von Pfählen und des Bewehrungskorbs; (c) Radargramm mit Lage der ausgewerteten Bewehrungsstäbe bei zweilagiger Bewehrung (1. Lage Brandschutz, 2. Lage Tragbewehrung)[7]..... | 14 |
| Abbildung 3: Messergebnisse über einen Tiefenbereich von 20 bis 80 mm mit (a) magnetischem Wechselfeld und (b) Radar; (c) Darstellung der ermittelten Lagen der verlegten Bewehrung [7]..... | 14 |
| Abbildung 4: Mit Radar an Stahlbetonbauteilen erzielbare Detektionstiefen von Bewehrungsstäben (Durchmesser 8 bis 28 mm) in Abhängigkeit von der Antennenmittenfrequenz des verwendeten Radargeräts, der Zementart (PK1: CEM-II; PK5: CEM-I; PK6: CEM-III) und dem Betonalter in Tagen [8]; entnommen aus [12]..... | 16 |
| Abbildung 5: Abweichung des angenommenen Laufweges im Beton von der tatsächlichen Betondeckung bei zwei verschiedenen Sender-Empfänger-Abständen a und verschiedenen Abständen der Radarantenne zum Messobjekt [17]..... | 19 |
| Abbildung 6: Modellgleichung, Messergebnis und Unsicherheits-Budget für die Modellbeispiele: Sender-Empfänger-Abstand 100 mm, Winkelabweichung 45°, Betondeckung 50 mm, Abstand der Antenne von der Betonoberfläche 0 bzw. 10 mm [17]..... | 19 |
| Abbildung 7: Systematische Abweichungen durch falsch eingestellten Bewehrungsdurchmesser; Einstellung im Gerät: Ø16 mm; tatsächlich vorh. Ø8 bis 28 mm; beispielhaft für Wirbelstromgerät mit absoluten Abweichungen in mm [19]..... | 22 |
| Abbildung 8: (a) Beispiel für einen in der Ausbildung verwendeten Testkörper zur Betondeckungsmessung (b) das zugrundeliegende Konzept [26]..... | 24 |
| Abbildung 9: Bewehrungsstab (a) vor und (b) nach dem Ausrichten. (c) Millimetergenaues Setzen von Bohrungen zum Einpassen der Bewehrungsstäbe. (d) Abgebogene Stabenden zum Ausrichten der Stäbe, so dass die Rippung immer genau gleich ausgerichtet ist..... | 26 |
| Abbildung 10: Testkörper HTW-TK1 (a) aufrecht und (b) Position zum Messen beider Seiten. | 28 |
| Abbildung 11: (a) Konstruktionszeichnung Längsschnitt HTW-TK1 mit präzise eingelegten Bewehrungsstäben ohne oberflächennahe Bewehrung; (b) fertig hergestellter Testkörper HTW-TK1.. | 28 |
| Abbildung 12: Testkörper HTW-TK4 | 29 |
| Abbildung 13: Konstruktionszeichnung HTW-TK4; siehe auch Anlage 2..... | 30 |
| Abbildung 14: Systematik der Anordnung der Stäbe im TK HTW-TK4. | 31 |
| Abbildung 15: a) Hilti PS 1000 X-Scan System Vorderseite b) Hilti PS 1000 X-Scan System Rückseite mit Markierung der Bowtie-Antennen c) Kommunikation der Antennen fünf Bowtie-Antennen untereinander..... | 34 |
| Abbildung 16: Profometer PM-630 | 35 |

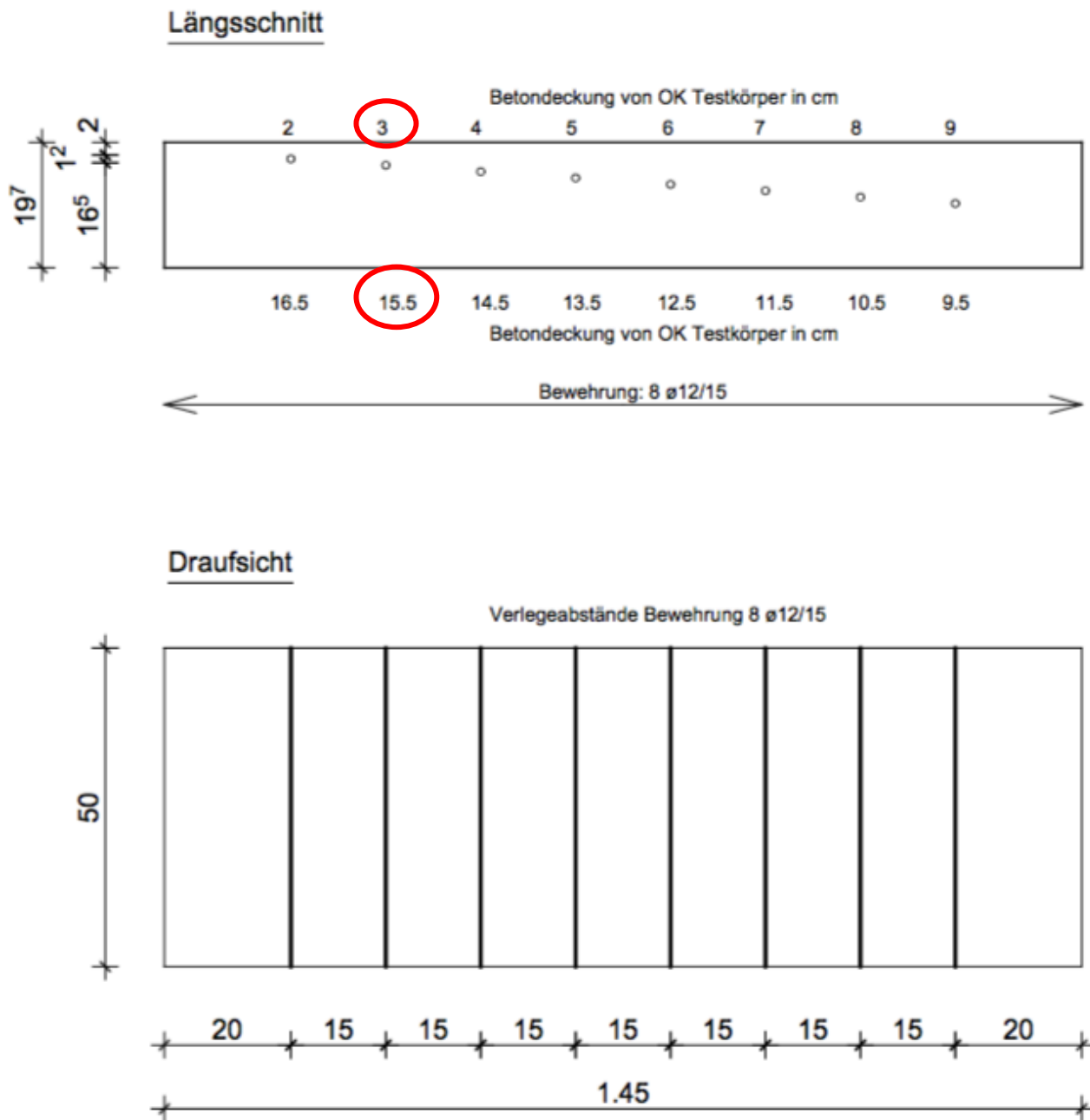
| | |
|--|----|
| Abbildung 17: Messbereiche und deren Genauigkeit (Herstellerangaben gemäß [28])..... | 36 |
| Abbildung 18: Angabe der Messgenauigkeit für das Profometer auf der Internetseite [30]..... | 36 |
| Abbildung 19: a) Profometer PM-630 b) Profoscopecdisplay beim Annähern eines Bewehrungsstabs [30] | 39 |
| Abbildung 20: Messbereich und Abweichungen vom Profoscope (Herstellerangaben gemäß [32])..... | 40 |
| Abbildung 21: GANN Aktiv-Elektrode B 50 und Hydromette M 4050..... | 41 |
| Abbildung 22: Feuchtemesspunkte an HTW-TK1 | 41 |
| Abbildung 23: Feuchtemesspunkte an HTW-TK4; auf der anderen Seite wurden die Messpunkte ebenso angeordnet | 42 |
| Abbildung 24: Messstrategie an HTW-TK1 – nur eine Messspur, da keine oberflächennahe Bewehrung vorhanden ist..... | 43 |
| Abbildung 25: Messstrategie an HTW-TK4 – je 2 Messspuren auf Vorder- und Rückseite..... | 44 |
| Abbildung 26: Auswertung als Ablaufdiagramm dargestellt..... | 45 |
| Abbildung 27: Anzeigewerte (Digits) der GANN Hydromette in Abhängigkeit von der Material-Rohdichte [33, S. 80]; Anmerkung: Spaltenüberschrift in der Gebrauchsanweisung falsch: anstatt Rohwichte ist die Rohdichte gemeint; ebenso ist in der ersten Zeile und ersten Spalte „Okt 20“ vermerkt, dies steht für „10- 20“..... | 47 |
| Abbildung 28: Entwicklung der Feuchtigkeit der Testkörper HTW-TK1 und HTW-TK4 nach Messung der Betonfeuchte mit der GANN Hydromette in Digits..... | 47 |
| Abbildung 29: Entwicklung der Permittivität über die Zeit: HTW-TK1, Hilti PS 1000 | 48 |
| Abbildung 30: Entwicklung der Permittivität über die Zeit: HTW-TK4, Hilti PS 1000 | 48 |
| Abbildung 31: exemplarische Profometer PM-630 Messung an HTW-TK1..... | 50 |
| Abbildung 32: Mittelwerte der gemessenen Betondeckungen im Vergleich zur Soll Betondeckung der einzelnen Bewehrungsstäbe am HTW-TK1 | 51 |
| Abbildung 33: absolute Abweichung von der Soll Betondeckung am HTW-TK1; Profometer PM-630 | 52 |
| Abbildung 34: absolute Abweichung von der Soll Betondeckung am HTW-TK1; Profoscope..... | 53 |
| Abbildung 35: Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit – bspw. für HTW TK-1 vom 15.06.2018 dargestellt..... | 60 |
| Abbildung 36: Radargramme von dem links jungen HTW-TK1 und rechts ausgehärtetem HTW-TK1 | 61 |
| Abbildung 37: Radargramme von dem links jungen HTW-TK4 und rechts ausgehärtetem HTW-TK4 | 62 |
| Abbildung 38: Ergebnisdarstellung HTW-TK1..... | 63 |
| Abbildung 39: Ergebnisdarstellung HTW-TK4..... | 65 |

Abbildung 40: Systematik der Anordnung der Stäbe im TK HTW-TK4.....66

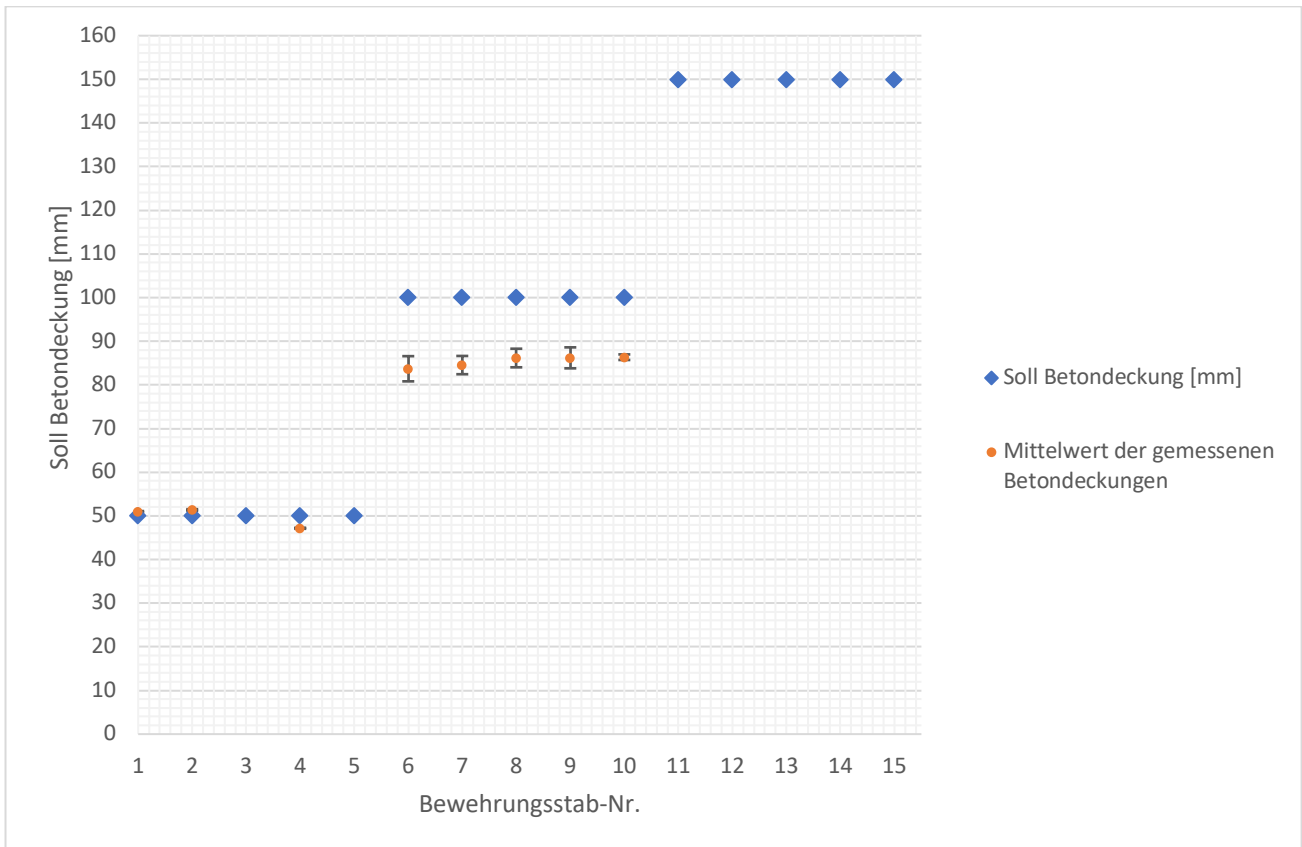
Abbildung 41: Messstrategie einer genauen Betondeckungsmessung [23]75

Abbildung 42: Vergleich der Möglichkeiten und Grenzen der einzelnen Verfahren zur
Betondeckungsmessung.....77

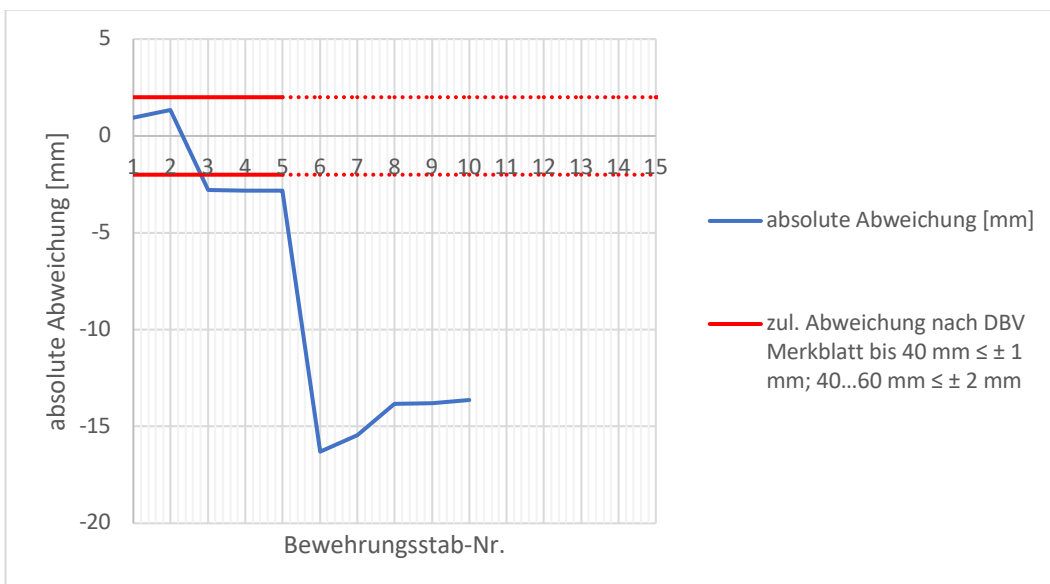
9 Anhang



Anlage 1: Konstruktionsplan HTW-TK 1



Mittelwert der gemessenen Betondeckungen im Vergleich zur Soll Betondeckung der einzelnen Bewehrungsstäbe am HTW-TK4



absolute Abweichung von der Soll Betondeckung an HTW-TK4

Anlage 3: unzulässige Abweichungen an HTW-TK4 mit dem Profometer PM-630

| geplante Betondeckung | gepickte Laufzeit | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|
| | 28.08.2017 | 08.09.2017 | 25.09.2017 | 12.10.2017 | 25.10.2017 | 15.11.2017 | 06.12.2017 | 03.01.2018 | | | | | |
| Datum | 0 | 12 | 29 | 46 | 59 | 80 | 102 | 130 | | | | | |
| Betonalter | | 1,5642 | 1,5642 | 1,5642 | 1,5642 | 1,5642 | 1,5642 | 1,5642 | | | | | |
| Nullpunktkorrektur in ns | | 0,093 | 0,0932 | 0,09325 | 0,09365 | 0,093 | 0,0955 | 0,0955 | | | | | |
| Ausbreitungs- geschwindigkeit in m/ns | | 10,406 | 10,361 | 10,350 | 10,262 | 10,406 | 9,868 | 9,868 | | | | | |
| Permittivität ε | | | | | | | | | | | | | |
| | | Laufzeit [ns] | dc [mm] | Laufzeit [ns] | dc [mm] | Laufzeit [ns] | dc [mm] | Laufzeit [ns] | dc [mm] | Laufzeit [ns] | dc [mm] | Laufzeit [ns] | dc [mm] |
| 20 | | 0,59246 | 28,21 | 0,64888 | 30,24 | 0,64888 | 30,38 | 0,67709 | 31,48 | 0,62067 | 29,64 | 0,63478 | 30,98 |
| 30 | | 0,78994 | 36,73 | 0,86047 | 40,10 | 0,86047 | 40,12 | 0,88869 | 41,32 | 0,81816 | 39,07 | 0,81816 | 38,39 |
| 40 | | 1,00154 | 46,57 | 1,04385 | 47,99 | 1,04385 | 48,88 | 1,10028 | 51,16 | 1,1564 | 48,5 | 1,02975 | 49,84 |
| 50 | | 1,17081 | 54,44 | 1,25545 | 57,85 | 1,24134 | 58,54 | 1,22723 | 57,47 | 1,25545 | 58,38 | 1,21313 | 57,93 |
| 60 | | 1,41061 | 65,59 | 1,43883 | 67,05 | 1,45293 | 67,09 | 1,42472 | 66,71 | 1,48115 | 68,22 | 1,41061 | 66,68 |
| 70 | | 1,56578 | 72,81 | 1,62221 | 75,59 | 1,62221 | 75,64 | 1,60810 | 74,64 | 1,63631 | 75,43 | 1,57989 | 75,44 |
| 80 | | 1,76327 | 81,34 | 1,8338 | 85,46 | 1,83380 | 85,5 | 1,81969 | 85,21 | 1,84791 | 85,93 | 1,77737 | 84,87 |
| 90 | | 1,93254 | 89,21 | 1,98897 | 92,69 | 2,00307 | 93,39 | 1,97486 | 92,47 | 2,01718 | 93,8 | 1,93254 | 92,95 |

| geplante Betondeckung | gepickte Laufzeit | | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|---------------|---------|---------------|---------|---------------|---------|
| | 13.02.2018 | 28.03.2018 | 09.05.2018 | 15.06.2018 | 23.07.2018 | 27.08.2018 | 08.10.2018 | 19.11.2018 | | | | | |
| Datum | 171 | 214 | 256 | 293 | 331 | 366 | 408 | 450 | | | | | |
| Betonalter | | 1,5642 | 1,5642 | 1,5642 | 1,5642 | 1,5642 | 1,5642 | 1,5642 | | | | | |
| Nullpunktkorrektur in ns | | 0,1 | 0,1015 | 0,1017 | 0,102 | 0,1023 | 0,1025 | 0,1028 | | | | | |
| Ausbreitungs- geschwindigkeit in m/ns | | 9,000 | 9,868 | 8,736 | 8,702 | 8,651 | 8,600 | 8,516 | | | | | |
| Permittivität ε | | | | | | | | | | | | | |
| | | Laufzeit [ns] | dc [mm] | Laufzeit [ns] | dc [mm] | Laufzeit [ns] | dc [mm] | Laufzeit [ns] | dc [mm] | Laufzeit [ns] | dc [mm] | Laufzeit [ns] | dc [mm] |
| 20 | | 0,49372 | 23,98 | 0,63478 | 30,31 | 0,47961 | 24,34 | 0,47961 | 24,39 | 0,47853 | 24,4 | 0,46835 | 23,44 |
| 30 | | 0,70531 | 35,97 | 0,81816 | 39,74 | 0,67709 | 33,65 | 0,67709 | 34,43 | 0,65161 | 33,23 | 0,64443 | 32,81 |
| 40 | | 0,88869 | 45,14 | 1,04385 | 49,84 | 0,88869 | 45,10 | 0,87458 | 45,19 | 0,86542 | 44,66 | 0,84506 | 42,7 |
| 50 | | 1,08617 | 54,31 | 1,19902 | 57,25 | 1,04385 | 52,98 | 1,04385 | 53,08 | 1,03851 | 52,96 | 0,99778 | 51,04 |
| 60 | | 1,25545 | 62,77 | 1,39651 | 67,36 | 1,22723 | 62,28 | 1,22723 | 63,12 | 1,22177 | 62,31 | 1,19123 | 60,93 |
| 70 | | 1,45293 | 74,06 | 1,59399 | 76,11 | 1,42472 | 73,02 | 1,42472 | 71,73 | 1,4254 | 72,7 | 1,40504 | 71,87 |
| 80 | | 1,63631 | 81,11 | 1,79148 | 86,22 | 1,6081 | 80,18 | 1,59399 | 81,77 | 1,58831 | 80,48 | 1,55776 | 79,68 |
| 90 | | 1,79148 | 89,57 | 1,96075 | 93,63 | 1,76327 | 89,49 | 1,76327 | 88,94 | 1,74103 | 88,27 | 1,73085 | 88,01 |

| | | geplante Betondeckung | gepickte Laufzeit | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--------------------------------------|--------------------------|---------------------------------------|------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---------|-------|---------|
| Datum | | | 09.04.2018 | 12.04.2018 | 16.04.2018 | 26.04.2018 | 03.05.2018 | 09.05.2018 | 17.05.2018 | | | | | | | | |
| Betonalter | | | 0 | 3 | 7 | 17 | 24 | 30 | 37 | | | | | | | | |
| Nullpunktkorrektur in ns | | | | 1,48472 | 1,48472 | 1,48472 | 1,48472 | 1,48472 | 1,48472 | | | | | | | | |
| Ausbreitungs- geschwindigkeit in m/ns | | | | 0,0965 | 0,09287 | 0,094 | 0,0965 | 0,0999 | 0,098 | | | | | | | | |
| Permittivität ε | | | | 9,665 | 10,435 | 10,186 | 9,665 | 9,018 | 9,371 | | | | | | | | |
| | | | Laufzeit [ns] | dc [mm] | Laufzeit [ns] | dc [mm] | Laufzeit [ns] | dc [mm] | Laufzeit [ns] | dc [mm] | Laufzeit [ns] | dc [mm] | Laufzeit [ns] | dc [mm] | | | |
| Seite 1 oben | mit oberflächennah bewehrten Bereich | 50 | 1,09 | 53,38 | 1,22 | 56,02 | 1,19 | 55,83 | 1,13 | 53,73 | 1,09 | 54,69 | 1,13 | 56,30 | | | |
| | | 50 | 1,11 | 54,28 | 1,21 | 56,02 | 1,22 | 57,37 | 1,15 | 55,52 | 1,09 | 55,62 | 1,17 | 57,29 | | | |
| | | 50 | 1,15 | 56,09 | 1,26 | 58,60 | 1,24 | 58,44 | 1,19 | 56,41 | 1,15 | 57,48 | 1,19 | 58,20 | | | |
| | | 50 | 1,24 | 60,62 | 1,22 | 568,80 | 1,19 | 55,83 | 1,11 | 53,73 | 1,09 | 55,62 | 1,13 | 55,47 | | | |
| | | 50 | 1,09 | 53,38 | 1,22 | 568,80 | 1,19 | 55,83 | 1,11 | 53,73 | 1,09 | 54,69 | 1,13 | 55,47 | | | |
| | | 100 | 2,06 | 100,43 | 2,17 | 101,69 | 2,13 | 100,31 | 2,08 | 100,29 | 2,00 | 101,05 | 2,06 | 100,94 | | | |
| | | 100 | 2,12 | 103,14 | 2,19 | 101,69 | 2,17 | 102,06 | 2,12 | 102,08 | 2,06 | 103,83 | 2,10 | 102,76 | | | |
| | | 100 | 2,12 | 103,14 | 2,23 | 103,41 | 2,23 | 104,67 | 2,13 | 102,98 | 2,10 | 104,75 | 2,12 | 103,67 | | | |
| | | 100 | 2,19 | 106,76 | 2,26 | 105,14 | 2,25 | 105,54 | 2,19 | 105,67 | 2,13 | 106,61 | 2,19 | 107,31 | | | |
| | | 100 | 2,10 | 102,24 | 2,21 | 102,55 | 2,17 | 102,06 | 2,10 | 101,19 | 2,06 | 102,90 | 2,10 | 103,67 | | | |
| | | 150 | 3,27 | 159,24 | 3,36 | 155,98 | 3,30 | 154,39 | 3,21 | 154,92 | 3,19 | 160,37 | 3,21 | 157,32 | | | |
| | | 150 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | |
| | | 150 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | |
| | | 150 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | |
| | | Seite 1 unten | ohne oberflächennah bewehrten Bereich | 50 | 1,11 | 54,28 | 1,24 | 57,74 | 1,19 | 56,70 | 1,15 | 55,52 | 1,08 | 53,77 | 1,17 | 57,29 | |
| 50 | 1,11 | | | 54,28 | 1,24 | 57,74 | 1,21 | 56,70 | 1,15 | 56,41 | 1,06 | 52,84 | 1,17 | 57,29 | | | |
| 50 | 1,17 | | | 57,00 | 1,28 | 59,46 | 1,24 | 58,44 | 1,19 | 56,41 | 1,13 | 56,55 | 1,19 | 59,11 | | | |
| 50 | 1,11 | | | 54,28 | 1,22 | 56,88 | 1,19 | 56,70 | 1,32 | 54,62 | 1,08 | 53,77 | 1,15 | 54,56 | | | |
| 50 | 1,11 | | | 53,38 | 1,22 | 56,88 | 1,19 | 55,83 | 1,13 | 54,62 | 1,04 | 52,84 | 1,15 | 56,38 | | | |
| 100 | 2,06 | | | 101,33 | 2,17 | 101,69 | 2,13 | 100,31 | 2,06 | 100,29 | 1,99 | 99,19 | 2,06 | 101,85 | | | |
| 100 | 2,10 | | | 100,24 | 2,19 | 102,55 | 2,13 | 101,18 | 2,08 | 100,29 | 1,99 | 98,26 | 2,12 | 102,76 | | | |
| 100 | 2,15 | | | 104,05 | 2,25 | 103,41 | 2,19 | 103,80 | 2,15 | 102,98 | 2,06 | 102,90 | 2,15 | 105,49 | | | |
| 100 | 2,15 | | | 104,95 | 2,41 | 111,17 | 2,32 | 109,91 | 2,26 | 109,25 | 2,21 | 109,39 | 2,26 | 110,95 | | | |
| 100 | 2,17 | | | 104,95 | 2,25 | 104,28 | 2,21 | 103,80 | 2,13 | 102,98 | 2,08 | 102,90 | 2,15 | 105,49 | | | |
| 150 | 3,10 | | | 152,00 | 3,19 | 148,23 | 3,14 | 148,29 | 3,08 | 149,54 | 2,99 | 150,18 | 3,08 | 150,96 | | | |
| 150 | 3,10 | | | 151,09 | 3,19 | 149,09 | 3,16 | 148,29 | 3,08 | 149,54 | 2,99 | 149,25 | 3,08 | 151,87 | | | |
| 150 | 3,19 | | | 159,45 | 3,28 | 152,54 | 3,21 | 150,90 | 3,16 | 152,23 | 3,04 | 151,10 | 3,17 | 155,51 | | | |
| 150 | 3,30 | | | 165,01 | 3,36 | 155,98 | 3,27 | 154,39 | 3,23 | 155,81 | 3,14 | 156,67 | 3,21 | 157,32 | | | |
| 150 | 3,27 | | | 162,23 | 3,32 | 154,26 | 3,25 | 152,65 | 3,19 | 154,02 | 3,12 | 155,74 | 3,19 | 156,41 | | | |
| Seite 2 oben | mit oberflächennah bewehrten Bereich | 200 | | | Gerät erkennt nur 1. Lage (Bewehrungsmatte) | Gerät erkennt nur 1. Lage (Bewehrungsmatte) | Gerät erkennt nur 1. Lage (Bewehrungsmatte) | Gerät erkennt nur 1. Lage (Bewehrungsmatte) | Gerät erkennt nur 1. Lage (Bewehrungsmatte) | Gerät erkennt nur 1. Lage (Bewehrungsmatte) | Gerät erkennt nur 1. Lage (Bewehrungsmatte) | Gerät erkennt nur 1. Lage (Bewehrungsmatte) | Gerät erkennt nur 1. Lage (Bewehrungsmatte) | Gerät erkennt nur 1. Lage (Bewehrungsmatte) | | | |
| | | 200 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 200 | | | 0,59 | 29,06 | 0,69 | 31,02 | 0,67 | 30,53 | 0,65 | 31,34 | 0,56 | 27,81 | 0,63 | 30,92 | |
| | | 200 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 250 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 250 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 250 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 250 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 300 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 300 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 300 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 300 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 300 | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Seite 2 unten | ohne oberflächennah bewehrten Bereich | 200 | | | Gerät erkennt keinen Bewehrungsstab | 4,12 | 191,320 | 4,05 | 190,160 | 4,01 | 193,420 | 3,90 | 193,750 | 3,97 | 193,700 |
| | | | | 200 | | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | |
| 200 | | | | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | |
| 200 | | | | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | |
| 200 | | | | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | |
| 250 | | | | | | 5,16 | 239,580 | 5,07 | 238,130 | 5,01 | 240,880 | 4,88 | 242,880 | 4,97 | 243,720 | | |
| 250 | | | | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | |
| 250 | | | | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | |
| 250 | | | | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | |
| 250 | | | | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | |
| 300 | | | | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | |
| 300 | | | | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | |
| 300 | | | | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | |
| 300 | | | | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | | |

Anlage 5: Messergebnisse HTW-TK4

| | | geplante Betondeckung | | gepickte Laufzeit | | | | | | | | | | | | | | |
|--|--|--------------------------|--|-------------------|--|------------------|--|------------------|--|------------------|--|------------------|--|------------------|--|---------|------|---------|
| Datum | | 24.05.2018 | | 08.06.2018 | | 25.06.2018 | | 23.07.2018 | | 27.08.2018 | | 08.10.2018 | | 19.11.2018 | | | | |
| Betonalter | | 45 | | 60 | | 77 | | 105 | | 140 | | 182 | | 224 | | | | |
| Nullpunktkorrektur in ns | | 1,48472 | | 1,48472 | | 1,48472 | | 1,54 | | 1,54 | | 1,54 | | 1,54 | | | | |
| Ausbreitungs- geschwindigkeit in m/ns | | 0,0999 | | 0,106 | | 0,09999 | | 0,102 | | 0,104 | | 0,1045 | | 0,1055 | | | | |
| Permittivität ε | | 9,018 | | 8,010 | | 9,002 | | 8,651 | | 8,321 | | 8,242 | | 8,086 | | | | |
| | | Laufzeit [ns] | dc [mm] | Laufzeit [ns] | dc [mm] | Laufzeit [ns] | dc [mm] | Laufzeit [ns] | dc [mm] | Laufzeit [ns] | dc [mm] | Laufzeit [ns] | dc [mm] | Laufzeit [ns] | dc [mm] | | | |
| Seite 1 oben | mit oberflächennah bewehrten Bereich | 50 | 1,13 | 55,47 | 0,98 | 52,13 | 1,09 | 54,75 | 1,07 | 54,74 | 0,98 | 51,15 | 1,02 | 54,48 | 0,99 | 52,93 | | |
| | | 50 | 1,15 | 56,38 | 0,98 | 53,12 | 1,11 | 55,68 | 1,07 | 54,74 | 1,01 | 52,18 | 1,02 | 53,45 | 1,01 | 53,45 | | |
| | | 50 | 1,19 | 57,29 | 1,00 | 53,12 | 1,17 | 57,53 | 1,09 | 56,48 | 1,05 | 55,24 | 1,10 | 57,05 | 1,06 | 56,04 | | |
| | | 50 | 1,13 | 55,47 | 0,98 | 52,13 | 1,09 | 54,75 | 1,06 | 53,87 | 1,00 | 52,18 | 1,04 | 53,97 | 1,00 | 52,41 | | |
| | | 50 | 1,13 | 56,38 | 0,95 | 49,18 | 1,09 | 53,82 | 1,02 | 52,13 | 0,98 | 50,64 | 1,02 | 53,45 | 0,98 | 51,37 | | |
| | | 100 | 2,06 | 100,30 | 1,89 | 100,33 | 2,02 | 101,15 | 1,96 | 100,79 | 1,92 | 100,26 | 1,92 | 100,74 | 1,90 | 100,15 | | |
| | | 100 | 2,12 | 103,67 | 1,93 | 101,31 | 2,06 | 103,00 | 2,01 | 101,66 | 1,95 | 101,28 | 1,97 | 102,80 | 1,95 | 102,22 | | |
| | | 100 | 2,10 | 101,85 | 1,93 | 102,30 | 2,10 | 104,86 | 2,01 | 102,52 | 1,96 | 101,79 | 2,00 | 104,34 | 1,94 | 102,74 | | |
| | | 100 | 2,17 | 106,40 | 1,99 | 105,25 | 2,13 | 106,71 | 2,06 | 105,13 | 2,00 | 103,33 | 2,03 | 150,88 | 2,01 | 105,86 | | |
| | | 100 | 2,12 | 103,67 | 1,95 | 103,28 | 2,06 | 103,93 | 2,01 | 102,52 | 1,94 | 100,77 | 1,98 | 103,31 | 1,93 | 101,19 | | |
| | | 150 | 3,21 | 157,32 | 3,01 | 159,35 | 3,16 | 157,75 | 3,12 | 158,13 | 3,03 | 157,04 | 3,06 | 159,85 | 2,99 | 157,75 | | |
| | | 150 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | |
| | | 150 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | |
| | | 150 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | |
| | | 150 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | |
| Seite 1 unten | ohne oberflächennah bewehrten Bereich | 50 | 1,15 | 55,47 | 0,98 | 52,13 | 1,13 | 58,46 | 1,07 | 55,76 | 1,00 | 52,18 | 1,06 | 56,02 | 1,03 | 53,97 | | |
| | | 50 | 1,15 | 56,38 | 0,98 | 51,15 | 1,13 | 56,60 | 1,08 | 56,27 | 1,02 | 53,71 | 1,09 | 56,54 | 1,04 | 55,00 | | |
| | | 50 | 1,19 | 58,20 | 1,02 | 54,10 | 1,15 | 57,53 | 1,11 | 57,80 | 1,05 | 54,73 | 1,09 | 57,05 | 1,05 | 55,52 | | |
| | | 50 | 1,17 | 57,29 | 0,97 | 51,15 | 1,13 | 56,60 | 1,09 | 56,27 | 1,00 | 51,66 | 1,05 | 54,48 | 1,00 | 52,93 | | |
| | | 50 | 1,11 | 54,56 | 0,95 | 51,15 | 1,09 | 55,68 | 1,05 | 54,73 | 0,99 | 51,66 | 1,06 | 55,51 | 1,00 | 52,93 | | |
| | | 100 | 2,04 | 100,30 | 1,89 | 100,33 | 2,00 | 100,22 | 1,94 | 100,26 | 1,95 | 100,77 | 1,96 | 102,28 | 1,91 | 100,67 | | |
| | | 100 | 2,08 | 101,85 | 1,89 | 100,33 | 2,04 | 102,07 | 1,98 | 102,82 | 1,92 | 99,75 | 1,96 | 102,28 | 1,91 | 100,67 | | |
| | | 100 | 2,13 | 103,67 | 1,95 | 103,28 | 2,10 | 105,78 | 2,04 | 106,40 | 2,02 | 105,37 | 2,03 | 106,39 | 1,99 | 104,30 | | |
| | | 100 | 2,25 | 109,13 | 2,06 | 109,18 | 2,21 | 110,42 | 2,05 | 106,91 | 2,00 | 104,35 | 2,03 | 106,39 | 2,00 | 105,34 | | |
| | | 100 | 2,13 | 104,58 | 1,97 | 104,26 | 2,12 | 104,86 | 2,07 | 106,91 | 2,02 | 104,86 | 2,05 | 106,91 | 2,00 | 104,82 | | |
| | | 150 | 3,06 | 150,96 | 2,86 | 151,48 | 3,03 | 150,33 | 2,93 | 152,43 | 2,90 | 150,90 | 2,91 | 152,14 | 2,86 | 151,00 | | |
| | | 150 | 3,08 | 150,96 | 2,86 | 151,48 | 3,01 | 150,33 | 2,95 | 153,46 | 2,90 | 150,39 | 2,93 | 153,17 | 2,87 | 152,04 | | |
| | | 150 | 3,14 | 152,78 | 2,91 | 1154,43 | 3,12 | 155,89 | 3,00 | 156,02 | 2,94 | 153,46 | 3,00 | 156,77 | 2,92 | 153,60 | | |
| | | 150 | 3,21 | 158,23 | 2,99 | 158,36 | 3,17 | 158,68 | 3,09 | 161,13 | 3,02 | 157,55 | 3,06 | 159,85 | 2,99 | 157,75 | | |
| | | 150 | 3,19 | 157,32 | 2,97 | 156,40 | 3,14 | 158,68 | 3,05 | 158,57 | 2,98 | 155,50 | 3,03 | 157,79 | 2,94 | 155,15 | | |
| Seite 2 oben | mit oberflächennah bewehrten Bereich | 200 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 200 | Gerät erkennt nur 1. Lage (Bewehrungsmatte) | | Gerät erkennt nur 1. Lage (Bewehrungsmatte) | | Gerät erkennt nur 1. Lage (Bewehrungsmatte) | | Gerät erkennt nur 1. Lage (Bewehrungsmatte) | | Gerät erkennt nur 1. Lage (Bewehrungsmatte) | | Gerät erkennt nur 1. Lage (Bewehrungsmatte) | | Gerät erkennt nur 1. Lage (Bewehrungsmatte) | | | |
| | | 200 | 0,65 | 31,83 | 0,50 | 26,56 | 0,63 | 30,62 | 0,53 | 26,59 | 0,52 | 27,62 | 0,59 | 30,84 | 0,51 | 26,46 | | |
| | | 200 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 250 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 250 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 250 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 250 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 300 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 300 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 300 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 300 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 300 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | Seite 2 unten | ohne oberflächennah bewehrten Bereich | 200 | 4,01 | 200,240 | 3,77 | 199,680 | 3,93 | 197,650 | 3,87 | 197,160 | 3,86 | 200,520 | 3,82 | 199,430 | 3,75 | 197,700 |
| | | | | 200 | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x |
| 200 | x | | | x | x | x | 3,82 | 191,160 | 3,75 | 191,140 | 3,70 | 192,330 | 3,73 | 194,800 | 3,65 | 192,510 | | |
| 200 | x | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | |
| 200 | x | | | x | x | x | 3,86 | 192,080 | 3,79 | 193,180 | 3,76 | 195,400 | 3,78 | 197,370 | 3,72 | 196,660 | | |
| 250 | 4,97 | | | 248,440 | 4,75 | 250,820 | 4,92 | 244,980 | 4,88 | 248,840 | 4,76 | 247,580 | 4,79 | 250,310 | 4,70 | 248,040 | | |
| 250 | x | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | |
| 250 | x | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | |
| 250 | x | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | |
| 250 | x | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | |
| 300 | x | | | x | 5,77 | 305,910 | 5,91 | 294,160 | 5,80 | 296,000 | 5,73 | 298,220 | 5,73 | 300,170 | 5,66 | 298,890 | | |
| 300 | x | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | |
| 300 | x | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | |
| 300 | x | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | |
| 300 | x | | | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | x | | |

Anlage 6: Fortsetzung Messergebnisse HTW-TK4

Modellgleichung zur Extremwertabschätzung für die Änderung der Laufzeit und die daraus resultierenden Abweichungen in der Permittivität (Anlage 7)

$$v = 0,098 \frac{m}{ns}$$

| | t [ns] | | d _c [m] | |
|----------------------|--------|---|--------------------|--|
| | 2,04 | → | 0,10094 | |
| Ausgangswert: | 2,06 | → | 0,10094 | |
| | 2,07 | → | 0,10276 | |
| | 2,09 | → | 0,10185 | |

→ Range: 0,05 – 0,06 ns

| | $\frac{2 * d}{t} = v \left[\frac{m}{ns} \right] = \frac{c_0}{\sqrt{\epsilon}}$ | $\epsilon = \frac{(c_0)^2}{v^2} \left[\frac{cm}{ns} \right]$ |
|-------------------------------|---|---|
| | $\frac{2 * 0,1}{2,04} = 0,098$ | 9,371 |
| ± 0,5 mm Ist- ≈ 2 % eckung | $\frac{2 * 0,0995}{2,04} = 0,098$ | 9,371 |
| | $\frac{2 * 0,1}{2,06} = 0,097$ | 9,565 |
| ± 0,5 mm Ist- Betondeckung | $\frac{2 * 0,1}{2,09} = 0,096$ | 9,766 |
| | $\frac{2 * 0,1005}{2,09} = 0,096$ | 9,766 |

≈ 2 %

$$\epsilon = \frac{(c_0)^2}{v^2} \left[\frac{cm}{ns} \right]$$

$$\epsilon = \left(\frac{30}{9,8} \right)^2 = 9,371$$

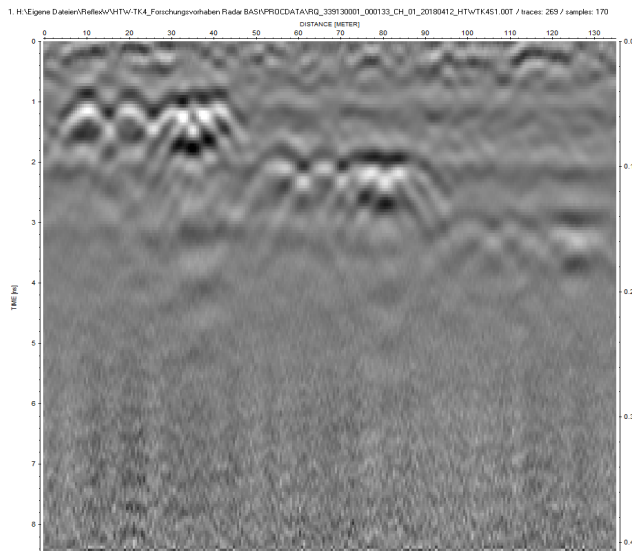
$$\epsilon = \left(\frac{30}{9,6} \right)^2 = 9,76$$

Vergleich der Radargeräte Proceq GPR und Hilti PS-1000 anhand des Testkörpers HTW-TK4 Seite 1 unten – ohne oberflächennahe Bewehrung (Anlage 8)

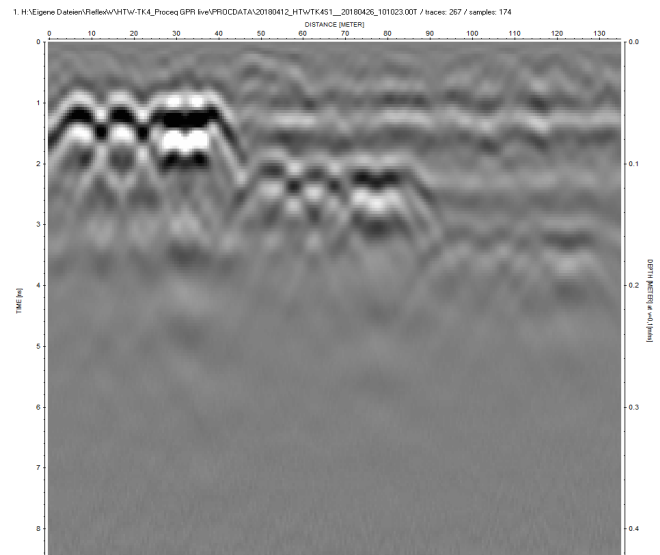
Für die Korrektur der Vorlaufzeit konnte der Ersteinsatz der Welle nicht eindeutig für das Proceq GPR live bestimmt werden, da sich dort die direkte Welle, die Reflexionen am Betonkörper und die geführte Welle im Beton überlagern. Daher wurde für die Kalibrierung der Ausbreitungsgeschwindigkeit die Laufzeitdifferenzen der Hyperbelspitzen für die Strecke zwischen den Reflexionen der Bewehrungsstäbe bei 5 und 10 cm sowie bei 10 und 15 cm bestimmt. Anschließend wurde diese gemittelt und daraufhin die Ausbreitungsgeschwindigkeit ermittelt. Diese Vorgehensweise weicht von der Vorgehensweise beim Hilti PS-1000 ab, sie ist aber genauer.

HTW-TK4 Seite 1 - ohne oberflächennahen bewehrten Bereich (unten)

Hilti PS-1000 12.04.2018
 $v = 0,0965 \text{ m/ns}$, $\epsilon = 9,665$

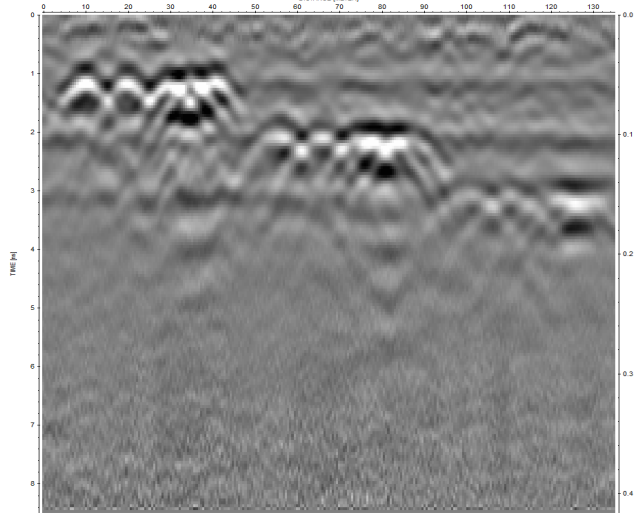


Proceq GPR Live 12.04.2018
 $v = 0,10 \text{ m/ns}$, $\epsilon = 8,38$



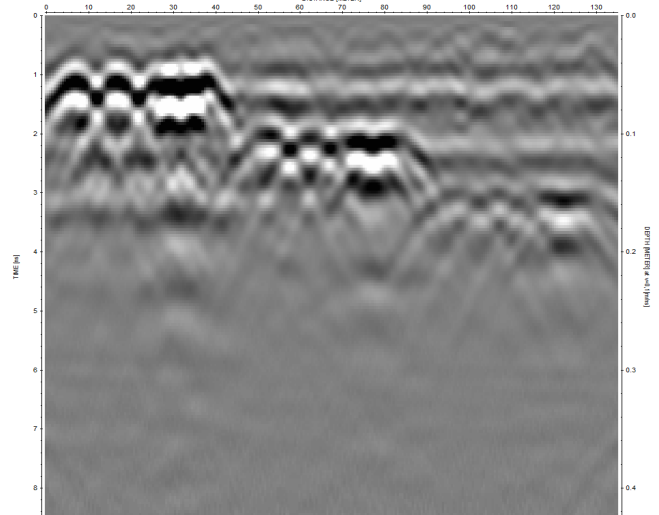
Hilti PS-1000 17.05.2018
 $v = 0,098 \text{ m/ns}$, $\epsilon = 9,371$

1. H:\Eigene Dateien\Reflexiv\HTW-TK4_Forschungsvorhaben Radar BASH\PROCDATA\FID_339130001_000179_CH_01_20180517_HTW\TK451_001 / traces: 269 / samples: 170



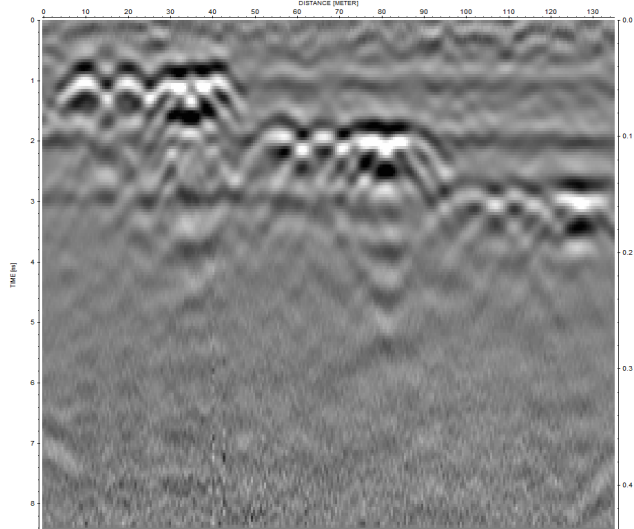
Proceq GPR Live 17.05.2018
 $v = 0,10 \text{ m/ns}$, $\epsilon = 8,47$

1. H:\Eigene Dateien\Reflexiv\HTW-TK4_Proceq GPR live\PRDCDATA\20180517_HTW\TK451_20180518_140534_001 / traces: 267 / samples: 174



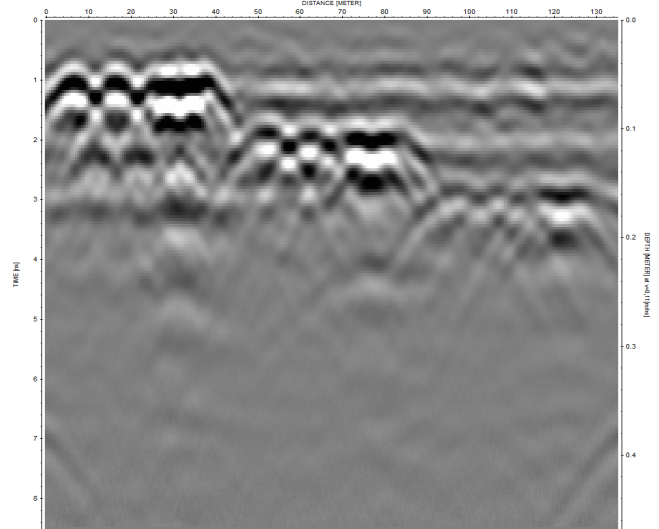
Hilti PS-1000 27.08.2018
 $v = 0,104 \text{ m/ns}$, $\epsilon = 8,321$

1. H:\Eigene Dateien\Reflexiv\HTW-TK4_Forschungsvorhaben Radar BASH\PROCDATA\FID_339130001_000238_20180827_HTW\TK451_001_001 / traces: 266 / samples: 169

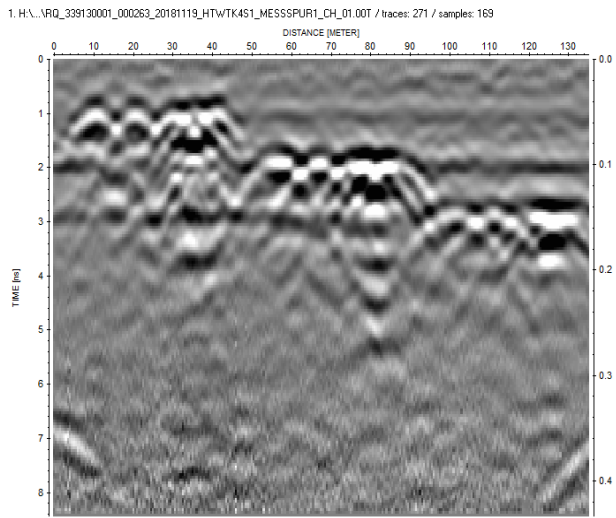


Proceq GPR Live 27.08.2018
 $v = 0,11 \text{ m/ns}$, $\epsilon = 7,56$

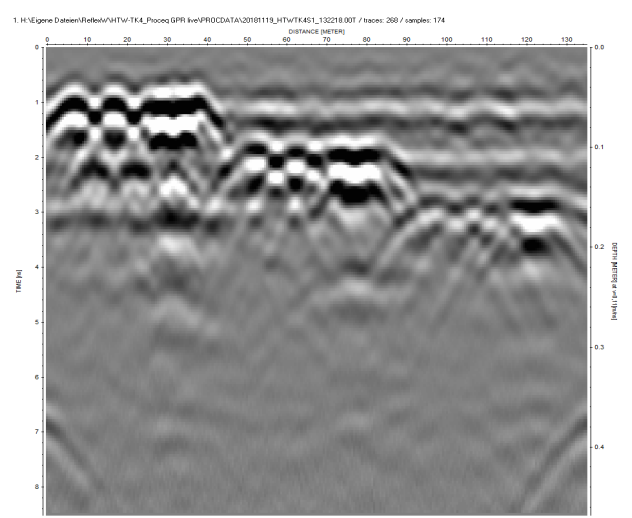
1. H:\Eigene Dateien\Reflexiv\HTW-TK4_Proceq GPR live\PRDCDATA\20180827_HTW\TK451_145822_001 / traces: 267 / samples: 174



Hilti PS-1000 19.11.2018
 $v = 0,1055 \text{ m/ns}$, $\epsilon = 8,086$

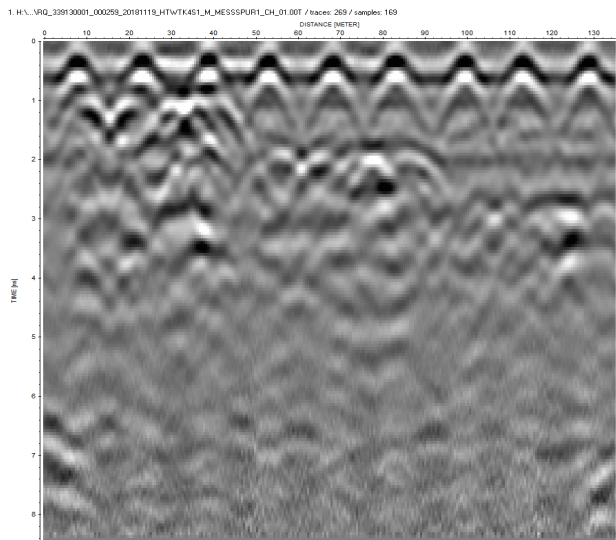


Proceq GPR Live 19.11.2018
 $v = 0,11 \text{ m/ns}$, $\epsilon = 7,20$

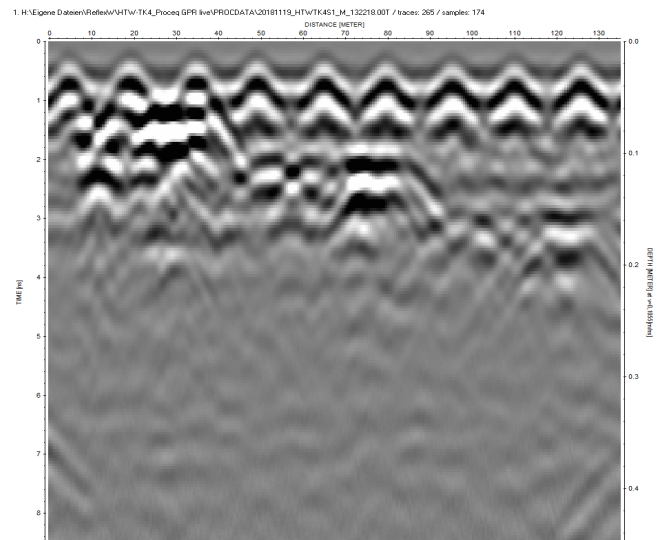


HTW-TK4 Seite 1 - mit oberflächennahen bewehrten Bereich (oben)

Hilti PS-1000 19.11.2018
 $v = 0,1055 \text{ m/ns}$, $\epsilon = 8,086$

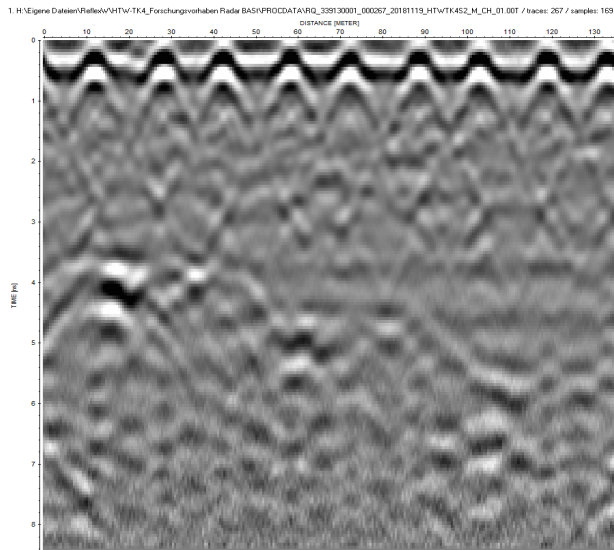


Proceq GPR Live 19.11.2018
 $v = 0,11 \text{ m/ns}$, $\epsilon = 7,20$

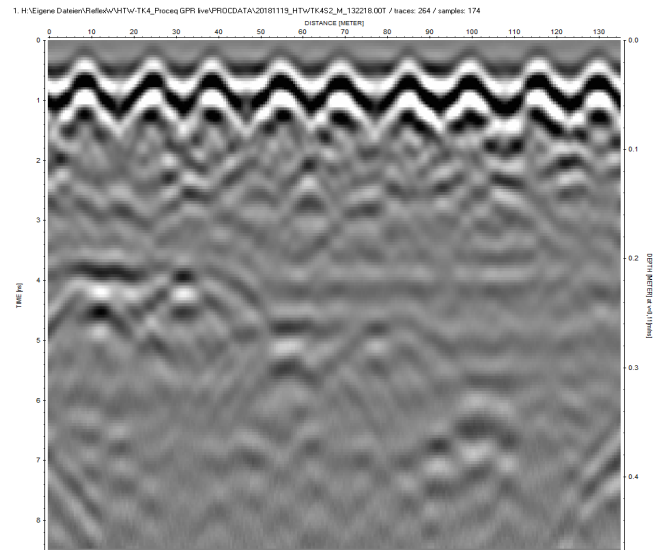


HTW-TK4 Seite 2 - mit oberflächennahen bewehrten Bereich (oben)

Hilti PS-1000 19.11.2018
 $v = 0,1055 \text{ m/ns}$, $\varepsilon = 8,086$

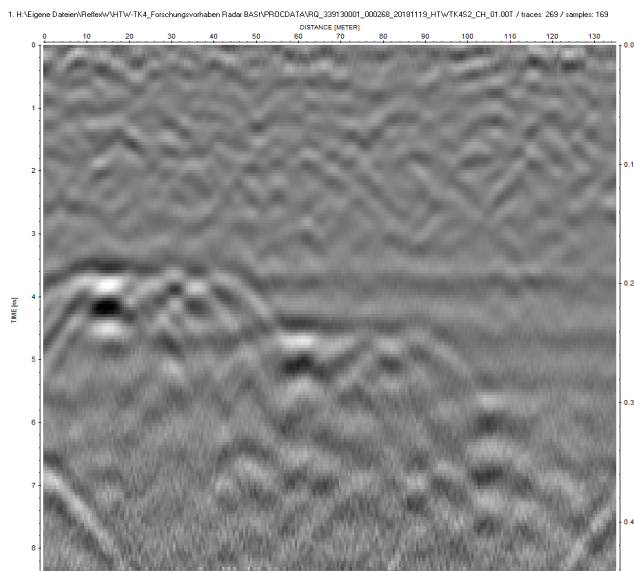


Proceq GPR Live 19.11.2018
 $v = 0,11 \text{ m/ns}$, $\varepsilon = 7,20$

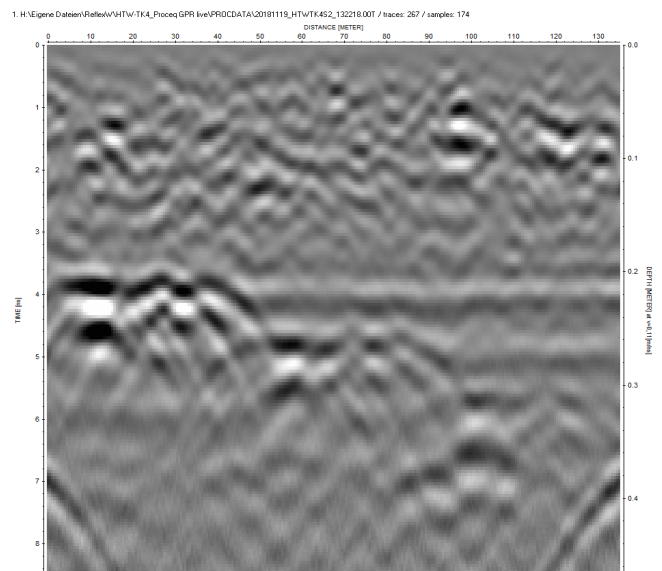


HTW TK4 Seite 2 - ohne oberflächennahen bewehrten Bereich (unten)

Hilti PS-1000 19.11.2018
 $v = 0,1055 \text{ m/ns}$, $\varepsilon = 8,086$



Proceq GPR Live 19.11.2018
 $v = 0,11 \text{ m/ns}$, $\varepsilon = 7,20$



Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2021

B 160: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottenlager

Butz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 161: Lagerwege von Brücken

Butz, Mack, Krawtschuk, Maldonado

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 162: Druckgurtanschluss in Hohlkastenbrücken – Ingenieurmodelle zur wirklichkeitsnahen Ermittlung der Tragfähigkeit

Müller

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 163: Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen

Hindersmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 164: Intelligente Bauwerke – Verfahren zur Auswertung, Verifizierung und Aufbereitung von Messdaten

Kleinert, Sawo

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 165: Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen

Deublein, Roth, Bruns, Zulauf

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 166: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen

Finger, Stolz, Fischer, Hasenstein, Rinder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 167: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Polyurethan

Staeck, Eilers

€ 15,50

B 168: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen

Rill

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 169: Entwicklung von Bemessungshilfen für bestehende Stahlbetonkragarme auf Basis nichtlinearer Berechnungen

Neumann, Brauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 170: Feuerverzinken als dauerhafter Korrosionsschutz für Stahlverbundbrücken – Praxisbericht zum Pilotprojekt

Ansorge, Franz, Düren-Rost, Friedrich, Huckshold, Lebelt, Rademacher, Ungermann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 171: Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 – Unterstützung durch (halb-) automatisierte Bildauswertung durch UAV (Unmanned Aerial Vehicles – Unbemannte Fluggeräte)

Morgenthal, Rodehorst, Hallermann, Debus, Benz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 172: Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken – Erfassung von Spannungszuständen in Spannbetonversuchsträgern mit Ultraschallsensoren

Niederleithinger, Werner, Galindo, Casares, Bertschat, Mierschke, Wang, Wiggenhauser

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 173: Vermeidung chloridinduzierter Korrosion in Tunnelinnenschalen aus Stahlbeton

Rudolph, Orgass, Schneider, Lorenz, Reichel, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2022

B 174: Kunststoffabdichtungen unter Brückenbelägen

Dudenhöfer, Rückert

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 175: Statische Vergleichsberechnung von gemauerten Gewölbebrücken zur Validierung des Entwurfs der neuen Nachrechnungsrichtlinie (Mauerwerk)

Purtak, Möbius

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 176: Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Asphalt in geringen Abmessungen – Belagsdehnfugen

Staeck

€ 15,00

B 177: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Synchronisation von Sensorik und automatisierte Auswertung von Messdaten

Freundt, Böning, Fischer, Lau

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 178: Intelligente Brücke – Reallabor Intelligente Brücke im Digitalen Testfeld Autobahn

Windmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 179: Erarbeitung eines vereinfachten Nachweisformats für die Erdbebenbemessung von Brückenbauwerken in Deutschland

Bauer, Gündel, Ries, Karius, Honerboom, Haug

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 180: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen – Einzelgabionen mit Steinfüllung

Schreck, Decker, Wawrzyniak

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 181: Querkraftbemessung von Brückenfahrbahnplatten

Maurer, Wentzek, Hegger, Adam, Rombach, Harter, Zilch, Tecusan

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 182: Building Information Modeling (BIM) im Brückenbau

Seitner, Probst, Borrmann, Vilgertshofer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 183: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln – Überprüfung der Annahmen und Parameter für Risikoanalysen

Kohl, Kammerer, Heger, Mayer, Brennberger, Zulauf, Locher

€ 18,00

B 184: Methodik und Prototyp für eine optimierte Planung von Ertüchtigung und/oder Ersatz wichtiger Brücken

Kindl, Stadler, Walther, Bornmann, Freitag
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 185: Bauwerksprüfung mittels 3D-Bauwerksmodellen und erweiterter/virtueller Realität

Hill, Bahlau, Butenhof, Degener, Klein, Kukushkin, Riedlinger, Oppermann, Lambracht, Mertens
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2023

B 186: Integration der Handlungsanweisungen Spannungsrisskorrosion und Koppelfugen in die Nachrechnungsrichtlinie

Zilch, Kriechbaum, Maurer, Heinrich, Weiher, Runtemund
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 187: Verstärkung des Deckblechs orthotroper Fahrbahnplatten durch Aufkleben von Stahlblechen

Friedrich € 18,00

B 188: Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Untersuchungsprogramm

Butz, Rill, Freundt, Böning, Werner, Fischer, Lau
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 189: Weiterentwicklung der Nachrechnungsrichtlinie – Validierung erweiterter Nachweisformate zur Ermittlung der Schubtragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken

Fischer, Thoma, Hegger, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 190: Potenziale von Monitoringdaten in einem Lebenszyklusmanagement für Brücken

Morgenthal, Rau, Hallermann, Schellenberg, Martín-Sanz, Schuber, Kübler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 191: Building Information Modeling (BIM) im Tunnelbau

Thewes, Vollmann, Wahl, König, Stepien, Riepe
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 192: Optimierung und Weiterentwicklung von Handlungshilfen zur Resilienzbewertung der Verkehrsinfrastruktur

Lindström, Zulauf, Rothenfluh, Bruns, Brunner, Roth, Caminada, Graf, Dahl
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 193: Konzepte für das Datenmanagement der Intelligenen Brücke

Empelmann, Javidmehr, Rathgen, Hellenbrand, Ulbricht, Wagner, Kessel, Sietas
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 194: Möglichkeiten und Grenzen der zukünftigen Anwendung von ZfP-Verfahren an Brücken- und Tunnelbauwerken

Taffe, Vonk
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.